

Scénarios de décarbonation du secteur transport en France et leurs impacts sur la biomasse, l'hydrogène et l'électricité

Octobre 2023



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

Résumé Exécutif

Dans son engagement à atteindre la neutralité carbone à horizon 2050 la France devra diviser par six les émissions de gaz à effet de serre de son territoire par rapport à 1990. Concernant le **secteur transport** l'objectif de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) est de réduire de 135 Mt CO₂eq les émissions du secteur pour atteindre un maximum de 4 MtCO₂eq en 2050.

La présente étude, réalisée par un groupe d'experts des GP1 et GP9 de l'alliance ANCRE, propose d'analyser **trois scénarios prospectifs de décarbonation du secteur transport français à 2050** (ELEC, HYB, THERM) envisageant différents mix technologiques véhicules/carburants en regard de la réglementation européenne imposant la fin de vente des véhicules thermiques neufs à partir de 2035. Pour chacun des scénarios les **impacts sur les demandes en biomasse, en hydrogène et en électricité** sont analysés afin d'identifier d'éventuelles tensions et émettre les recommandations associées. Enfin une sensibilité sur l'évolution des demandes en mobilité passagers et marchandises est proposée sur deux des scénarios (ELEC_SOB et THERM_SOB) afin d'évaluer **le rôle de la prise en compte de leviers de sobriété** renforcés sur les demandes en énergies finales et ressources énergétiques dans l'atteinte de ces objectifs climatiques.

Le principal déterminant des scénarios est la contrainte sur les ventes de véhicules neufs à motorisation thermique induisant différents niveaux d'électrification et d'hydrogénation des parcs, qui seront ainsi (i) élevés dans un scénario interdisant strictement la vente de véhicules thermiques à 2035 (scénario ELEC), (ii) intermédiaires dans un scénario autorisant la poursuite de la vente de véhicules hybrides rechargeables (scénario HYB) et (iii) plus faibles dans un scénario autorisant la vente de véhicules thermiques roulant aux carburants 100% renouvelables (scénario THERM). Pour l'ensemble des scénarios, les carburants liquides du transport routier sont en 2050 totalement substitués par des alternatives renouvelables, soit par des biocarburants, soit par des e-fuels à base d'hydrogène produit par électrolyse. Les trajectoires de déploiement des carburants alternatifs suivent les objectifs des directives européennes REDII à 2030 et ReFuelEU aviation à 2050 pour le secteur aérien. Par ailleurs la production d'hydrogène pour les FCEV ou pour les e-fuels est considérée comme 100% non fossile à partir de 2030.

L'évolution de la composition des parcs et des demandes en énergies associées dans chacun des scénarios est alors modélisé en dynamique des systèmes via le module transport du modèle OPERA développé par l'ANCRE pour la mise en œuvre de ses exercices prospectifs. Parmi les résultats obtenus on note des trajectoires de consommation de carburants liquides réduites de 84 % et 69% entre 2015 et 2050 pour les scénarios ELEC et THERM respectivement (soit entre 4,7 et 7 Mtep pour le gazole et entre 1,8 et 6 Mtep pour l'essence en 2050). En fin d'horizon, les carburants alternatifs liquides représentent ainsi **5 à 8 Mtep de biocarburants** (contre 2,5 Mtep aujourd'hui) et **1,2 à 5 Mtep de e-fuels dans le transport routier**. La consommation de biométhane est ici évaluée à environ 3 Mtep pour ces scénarios qui considèrent tous une substitution totale de la demande en GNV par du biométhane. Pour le transport aérien, dont la demande en énergie est ici considérée comme stable, biocarburants et e-fuel représentent une incorporation égale à 2,45 Mtep chacun. Le besoin **d'électricité pour l'électrification du parc roulant** atteint quant à lui entre **73 et 103 TWh d'ici à 2050** pour les scénarios THERM et ELEC respectivement. En ajoutant la **demande en électricité associée à la production d'hydrogène des e-fuels**, la demande en électricité totale pour le secteur transport atteint ici **entre 264 et 302 TWh** en fin d'horizon, avec une demande finalement plus élevée pour le scénario THERM. Ainsi pour les trois scénarios analysés, électricité et hydrogène bas carbone se montrent ici des vecteurs énergétiques particulièrement convoités, dont la demande se retrouve en forte

augmentation par rapport aux usages actuels et dont les conditions de développement nécessitent d'être spécifiquement analysées et anticipées. Un constat qui pourrait par ailleurs être accentué en cas d'augmentation du trafic aérien. Notons que la présente étude n'inclue pas de contraintes sur le déploiement des moyens de production électriques, contrairement à celle de RTE. L'intégration de ce type de contrainte, liée notamment au contexte économique est une perspective de l'étude.

Concernant l'analyse de la demande en biomasse pour la production de biocarburants, les résultats du modèle OPERA ont ici été comparés à des trajectoires de disponibilités potentielles en biomasse énergie pour la France à 2050 définies par un groupe de travail dédié du GP1 de l'ANCRE. On note ici que pour l'ensemble des scénarios étudiés le secteur transport à lui seul ne semble pas induire de nouvelles tensions sur les ressources en dehors d'une **dépendance persistante aux importations d'huiles et graisses usagées** requises par les technologies permettant de répondre aux demandes en biogazole et biojet en amont du développement des technologies lignocellulosiques avancées. Cette dépendance est observée dans un contexte où les huiles algales ne sont rendues disponibles que tardivement (post 2040) et où le recours à de nouveaux systèmes de cultures oléagineuses non alimentaires (caméline ou Brassica carinata en cultures intermédiaires) n'est pas considéré pour la production de biocarburants liquides. En considérant les demandes en biomasses de l'ensemble des secteurs énergétiques (chaleur biomasse, cogénération biomasse, biométhane injecté dans le réseau, etc.) on peut cependant s'attendre à de potentielles tensions locales sur certaines biomasses méthanisables et certaines ressources lignocellulosiques en particulier dans un scénario peu électrifié (THERM). Pour un tel scénario, la **mise en place de moyens spécifiques devient nécessaire pour une mobilisation accrue du potentiel** en résidus agricoles, forestiers et industriels ainsi que pour le déploiement de cultures dédiées en CIVE et cultures lignocellulosiques pérennes.

Enfin le **levier de sobriété** sur la demande en mobilité des transports de passagers et de marchandises appliqué aux scénarios ELEC et THERM permet dans cet exercice de diminuer de 20% la demande en gazole, et de 10% les demandes en essence et en jet. La demande totale en hydrogène est réduite de 16% tandis que la **demande en électricité baisse de 11 à 15%** pour les scénarios ELEC et THERM respectivement. De telles variantes permettent aussi **d'alléger la dépendance aux importations d'huiles usagées et de supprimer d'éventuelles pressions sur les ressources lignocellulosiques**, en suivant une trajectoire de demande compatible avec celle d'un potentiel en biomasse s'affranchissant du recours aux cultures pérennes en 2050. **Un levier de sobriété apparaît donc comme nécessaire en complément des évolutions technologiques étudiées.**

Executive Summary

As part of its commitment to achieve carbon neutrality by 2050, France will have to reduce its greenhouse gas emissions by a factor of six compared with 1990 levels. As far as the transport sector is concerned, the objective of the National Low Carbon Strategy (SNBC) is to reduce the sector's emissions by 135 Mt CO₂eq to no more than 4 MtCO₂eq in 2050.

This study, carried out by a group of experts from GP1 and GP9 of the ANCRE alliance, analysed **three prospective scenarios for the decarbonisation of the French transport sector by 2050** (ELEC, HYB, THERM). The study considers different vehicle/fuel technology mixes, taking into account the European regulations which will ban the sales of new combustion engine vehicles from 2035. For each of the scenarios, **the impact on demand for biomass, hydrogen and electricity** is analysed in order to identify any potential tensions and make related recommendations. Finally, a sensitivity analysis on the evolution of passenger and freight mobility demands is proposed for two of the scenarios (ELEC_SOB and THERM_SOB) in order to assess the increased role of sobriety levers on final energy demands in order to reach these climate objectives.

The main determinant of the scenarios is the constraint on sales of new internal combustion engine vehicles, leading to different levels of electrification and hydrogenation of the fleets. This will be (i) high in a scenario strictly prohibiting the sale of internal combustion engine vehicles in 2035 (ELEC scenario), (ii) intermediate in a scenario authorising the continued sale of plug-in hybrid vehicles (HYB scenario) and (iii) low in a scenario authorising the sale of internal combustion engine vehicles running on 100% renewable fuels (THERM scenario). For all the scenarios, liquid fuels for road transport are completely replaced by renewable alternatives in 2050, either by biofuels or by e-fuels based on hydrogen produced by electrolysis. The deployment pathways for alternative fuels are in line with the objectives of the European directives REDII to 2030 and ReFuelEU aviation to 2050 for the aviation sector. In addition, hydrogen production for FCEVs or e-fuels is considered 100% fossil-free from 2030.

The evolution of the composition of the vehicle fleets and the associated energy demands in each of the scenarios are then modelled in system dynamics using the transport module of the OPERA model developed by ANCRE for the implementation of its prospective exercises. The results include liquid fuel consumption trajectories reduced by 84% and 69% between 2015 and 2050 for the ELEC and THERM scenarios respectively (i.e. between 4.7 and 7 Mtoe for diesel and between 1.8 and 6 Mtoe for petrol in 2050). By the end of the horizon, alternative liquid fuels will account for **5 to 8 Mtoe of biofuels** (compared with 2.5 Mtoe today) and **1.2 to 5 Mtoe of e-fuels in road transport**. Biomethane consumption is estimated here at around 3 Mtoe for these scenarios, which all assume total substitution of CNG demand by biomethane. For air transport, where energy demand is considered to be stable, biofuels and e-fuel represent an incorporation equal to 2.45 Mtoe each. **The electricity requirement for the electrification of the road vehicles** is estimated at between **73 and 103 TWh by 2050** for the THERM and ELEC scenarios respectively. If we add the **electricity demand associated with the production of hydrogen from e-fuels**, total electricity demand for the transport sector reaches between **264 and 302 TWh** by the end of the horizon, with a higher demand in the THERM scenario. Thus, for the three scenarios analysed, low carbon electricity and hydrogen are particularly coveted energy vectors, with demand rising sharply compared with current use, and the conditions for their development need to be specifically analysed and anticipated. This situation could be made worse by an increase in air traffic. It should be noted that this study does not include constraints on electricity deployment, unlike the RTE study. The integration of this type of constraint, linked in particular to the economic context, is a perspective of the study.

With regard to the analysis of biomass demand for biofuel production, the results of the OPERA model have been compared with potential biomass energy availability trajectories for France by 2050, as defined by a dedicated working group of ANCRE's GP1. It should be noted here that for all the scenarios studied, the transport sector alone does not seem to lead to any new pressure on resources, apart from a **persistent dependence on imports of used oils and fats** required by the technologies used to meet demand for biodiesel and biojet, upstream of the development of advanced lignocellulosic technologies. This dependence is observed in a context where algal oils are only becoming available at a late stage (post 2040) and where the use of new non-food oilseed crop systems (camelina or Brassica carinata as intermediate crops) are not considered for the production of liquid biofuels. However, given the demand for biomass in all energy sectors (biomass heat, biomass cogeneration, biomethane injected into gas grid, etc.), we can expect potential local tensions over certain fermentable biomasses and certain lignocellulosic resources, particularly in a scenario with low electrification (THERM). In such a scenario, **specific resources will be needed to mobilise more of the potential** in agricultural, forestry and industrial residues, and to deploy dedicated crops of CIVE and perennial lignocellulosic crops.

Finally, the **sobriety lever** on the demand for mobility in passenger and freight transport applied to the ELEC and THERM scenarios enables us in this exercise to reduce demand for diesel fuel by 20%, and for petrol and jet fuel by 10%. Total hydrogen demand is reduced by 16%, while **electricity demand falls by 11-15%** for the ELEC and THERM scenarios respectively. Such alternative scenarios also make it possible to **reduce dependence on imports of used oil** and to **eliminate any pressure on lignocellulosic resources**, by following a demand trajectory compatible with that of a biomass potential that will no longer require the use of perennial crops in 2050. **A sobriety lever therefore appears to be necessary in addition to the technological developments.**

Table des matières

Résumé Exécutif	2
Executive Summary	4
AVERTISSEMENT	7
1. Introduction.....	8
2. Modélisation des secteurs.....	10
2.1. Transport.....	11
2.1.1. Transport passager	12
2.1.2. Transport de marchandises	15
2.2. Hydrogène.....	21
2.3. Biomasse	24
2.3.1. Ressources considérées.....	24
2.3.2. Fléchage et priorisation des usages des biomasses	30
2.3.3. Usages en biocarburants liquides et gazeux.....	31
2.4. Autres secteurs	38
2.4.1. Mix électrique.....	38
2.4.2. Biomasse énergie hors transport.....	39
3. Résultats	40
3.1. Emissions GES	40
3.2. Carburants liquides et substituts	41
3.3. Consommation d'hydrogène et d'électricité	44
3.4. Demande en biométhane	46
3.5. Besoins en ressources biomasse.....	47
3.5.1. Ressources pour biocarburants conventionnels	49
3.5.2. Ressources pour biocarburants « avancés » et « autres »	52
3.5.3. Ressources pour la méthanisation.....	56
4. Variantes sobriété	59
4.1. Description des trajectoires sobriété.....	59
4.2. Résultats des variantes sobriété	64
5. Conclusion	69
Table des figures et tableaux	71
Références.....	74
Annexes	76

AVERTISSEMENT

La présente étude a principalement été réalisée et rédigée par des membres de deux groupes programmatiques de l'ANCRE, à savoir :

- GP1 – Énergies issues de la biomasse, agriculture :
 - Daphné Lorne (IFPEN),
 - Guillaume Boissonnet (CEA),
 - Monique Axelos (INRAE)
 - Jack Legrand (CNRS – GEPEA),
- GP9 - Prospective et économie de l'énergie :
 - Pascal Gastineau (Université Gustave Eiffel),
 - Robin Roure (CEA),

L'étude s'appuie sur un modèle développé initialement sous VENSIM par Anne Baschwitz (CEA) pour le GP9.

La méthodologie utilisée, ainsi que les résultats obtenus, relèvent de la seule responsabilité des rédacteurs qui ont réalisé l'étude. Ils n'engagent ni l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE), ni l'ensemble des organismes membres de l'Alliance. Les parties intéressées sont invitées, le cas échéant, à faire part de leurs commentaires aux membres de l'équipe projet cités ci-dessus.

1. Introduction

Dans le cadre de la lutte contre le dérèglement climatique, la France s'est engagée en 2015 en signant l'Accord de Paris à limiter l'augmentation de la température moyenne à 2°C. Pour cela, elle doit atteindre la neutralité carbone le plus rapidement possible, et cet objectif a été fixé à 2050 dans la loi énergie-climat de 2019.

La Stratégie Nationale Bas-Carbone [1] est la feuille de route sectorielle de la France pour atteindre ses objectifs climatiques. Après un premier objectif de division des émissions par 4 par rapport à 1990, la neutralité carbone, soit « un équilibre, sur le territoire national, entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre » est désormais l'objectif à 2050. Cela correspond à diviser par 6 les émissions de gaz à effet de serre sur le territoire français par rapport à 1990, soit une réduction des émissions de la France à 80 MtCO₂eq contre 458 MtCO₂eq en 2015.

L'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE) rassemble depuis 2009 17 organismes de recherche et innovation et conférences d'établissements d'enseignement supérieur dans le domaine de l'énergie. La présente étude vise à valoriser les expertises recherche disponibles au sein de l'ANCRE afin de proposer des scénarios prospectifs pour les voies de décarbonation du système énergétique français.

Ce rapport se concentre sur les évolutions des demandes dans le secteur du transport, de passagers et de marchandises, et leurs impacts sur les demandes en biomasse, hydrogène et électricité.

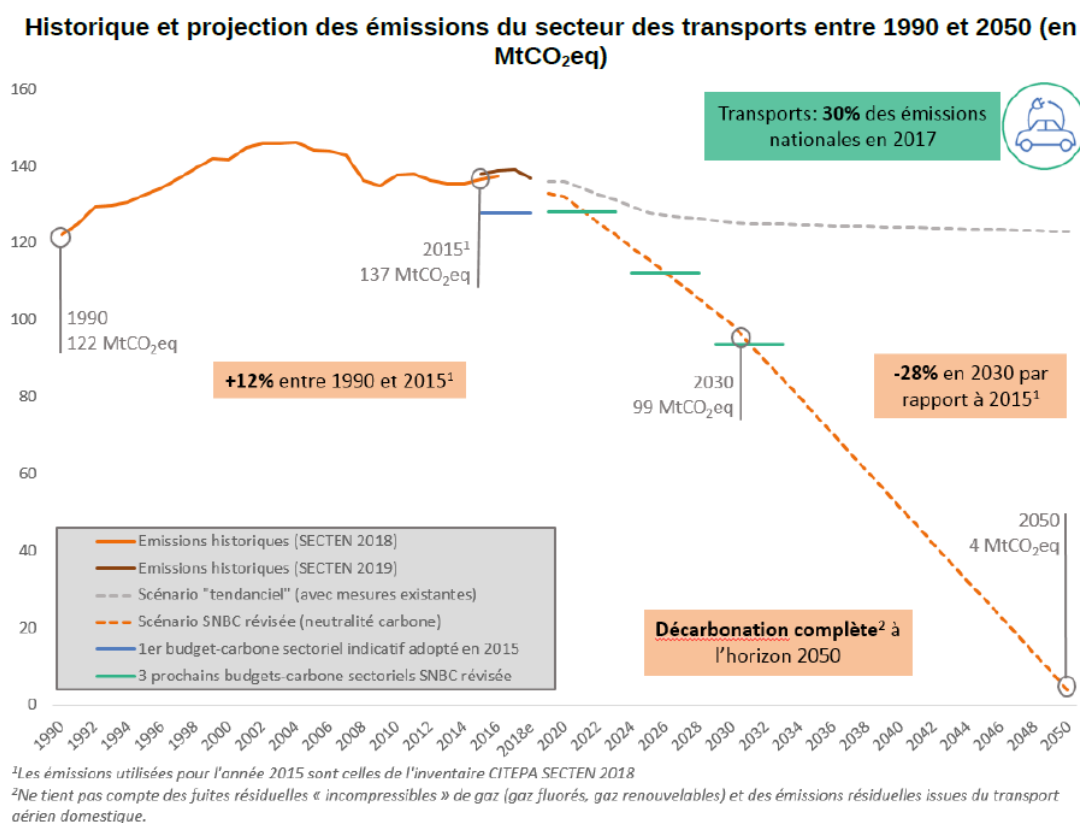


Figure 1. Trajectoire des émissions du secteur transport dans la SNBC (MTES)

Le transport représentait en 2017 30% des émissions nationales, soit 139 MtCO₂eq (hors soutes internationales) et la SNBC vise 4 MtCO₂eq en 2050 (part incompressible due à des émissions résiduelles du transport aérien domestique et de fuites résiduelles de gaz), cela implique donc une réduction de 135MtCO₂eq en moins de 35 ans (voir Figure 1).

Ce document présente plusieurs trajectoires de décarbonation de ce secteur à horizon 2050, avec dans un premier temps un détail des différentes variables des secteurs modélisés (à savoir le transport, l'hydrogène et la biomasse) pour 3 scénarios de développements technologiques. Sont ensuite analysés les résultats d'impacts associés à ces scénarios obtenus grâce au modèle OPERA. Enfin une variante de ces scénarios incluant des leviers de sobriété est proposée.

2. Modélisation des secteurs

La modélisation globale du système énergétique français et des scénarios repose sur le modèle en dynamique des systèmes OPERA (Outil de Prospective EneRgétique de l'ANCRE). Ce modèle a été développé au sein de l'ANCRE grâce à la contribution des différents groupes programmatiques (GP) et comporte des modules portants sur la demande énergétique (agriculture, transport, bâtiment, industrie) ainsi que sur les différents vecteurs énergétiques et leurs moyens de production (électricité, chaleur, gaz, hydrogène). Il est alimenté par les dires d'experts de l'Alliance et a notamment été utilisé en 2013 [2] et 2017 [3] pour la production de scénarios de transition énergétique de l'ANCRE dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) et de l'ancien objectif de réduction des émissions de CO₂ d'un facteur 4.

Ce modèle très global peut aussi être utilisé pour la création de scénarios portant sur des secteurs plus spécifiques, comme c'est le cas ici.

On s'intéresse dans cette étude à l'impact de différentes variantes de décarbonation du transport passager et fret sur l'utilisation des ressources biomasses et à l'impact sur les demandes en hydrogène et électricité.

Pour cela, **3 scénarios technologiques de demande sont envisagés** :

- **Un scénario électrique (dit ELEC)** : interdiction à partir de 2035 de la vente des véhicules passagers (VP) à motorisation thermique pour les véhicules particuliers (VP) ; pour le fret forte pénétration des véhicules électriques pour les courtes distances et des véhicules électriques à pile à combustible (FCEV) pour les longues distances.
- **Un scénario hybride (dit HYB)** : à partir de 2035 on conserve des ventes de véhicules thermiques mais seulement de type hybrides rechargeables (ou « plug-in hybrid ») ; pour le fret, mêmes hypothèses que le scénario ELEC.
- **Un scénario thermique (dit THERM)** : la loi sur l'interdiction des ventes VP thermiques en 2035 inclut une exception permettant la vente de VP thermiques utilisant des carburants non fossiles, la décarbonation sera effectuée en combinant les substituts bio ou e-carburants aux carburants liquides en plus de l'électrification ; pour le fret, la pénétration des véhicules FCEV est moins importante que pour les scénarios ELEC et HYB.

Les scénarios décrits dans ce document sont des scénarios de **prospective**. Ils ne constituent pas des prévisions du futur, mais permettent de décrire des futurs possibles et d'étudier les conséquences d'un jeu d'hypothèses sur un système donné. On s'intéresse ici à des scénarios principalement axés sur la demande énergétique, sans limites imposée sur l'offre d'approvisionnement, et dont les hypothèses ont été choisies notamment en fonction d'objectifs inscrits dans les réglementations françaises et européennes en vigueur. Le détail de ces scénarios et leur déclinaison dans les différents secteurs modélisés est détaillé dans les sections suivantes.

2.1. Transport

La demande du secteur transport se décompose entre le transport passager et le transport de marchandises.

Du fait des incertitudes techniques (arrivée à maturité de certaines technologies, disponibilité de certains matériaux, etc.), politiques (mise en œuvre de mesures contraignantes telles que les zones à faibles émissions mobilité (interdiction de la circulation des véhicules les plus polluants dans certaines zones), l'interdiction de la vente des véhicules thermiques, etc.) et comportementales (acceptabilité de certaines mesures, adoption de comportements 'écologiques, etc.), le nombre de trajectoires possibles est très important. Pour cet exercice, nous avons sélectionné un certain nombre d'options contrastées. Nous resituons les scénarios étudiés en perspective avec les autres scénarios produits ces dernières années et auxquels il est le plus fréquemment fait référence (ADEME [4], France Stratégie (FS) [5], SNBC [1], IDDRI/Briand et al. [6], Transport & Environnement [7]).¹ Ces exercices de prospective diffèrent par la méthode adoptée et les hypothèses énoncées (et même parfois par le domaine couvert) ; ils ne peuvent donc pas nécessairement être directement comparés. Nous nous limiterons donc à positionner nos trajectoires relativement aux autres scénarios (sur la base d'indicateurs simples) afin de permettre au lecteur de pouvoir situer et discuter les hypothèses et trajectoires utilisées pour cet exercice.

Pour l'analyse, deux trajectoires d'évolution de la mobilité ont été retenues : "BASE" et "SOB". La première (Sections 2.1.1 et 2.1.2), utilisée dans l'analyse principale (Section 3), correspond à une situation où l'effort de décarbonation du transport est essentiellement assuré par la diffusion de nouvelles technologies (motorisations et carburants). Pour cette trajectoire, la demande de mobilité des passagers (exprimée en passagers kilomètres) **croît, en moyenne, à un taux annuel de 0,66%/an**, tandis que le transport de marchandises (exprimé en tonnes-kilomètres) croît, lui, à un taux annuel moyen de 1,03%/an (« BASE »).

Une deuxième trajectoire d'évolution de la mobilité est ensuite proposée comme variante et analysée en relatif à la précédente en dernière section de rapport (Section 4). Celle-ci correspond à une situation où la demande de transport de passagers **croît à un rythme modéré jusqu'en 2035 (0,35%/an) puis décroît entre 2035 et 2050 à un taux de -0,2%/an**, tandis que le transport de marchandises, lui, croît en moyenne à 0,29%/an jusqu'en 2050 (« SOB »). Cette trajectoire dite « modérée » est un peu moins ambitieuse que ne peuvent l'être d'autres scénarios qualifiés de « sobres », souvent associés à des ruptures comportementales et organisationnelles plus marquées, et se traduisant généralement par une décroissance de la demande de mobilité plus forte (-0,86%/an, par exemple, dans le cas de la mobilité des passagers du scénario S1 de l'ADEME). Elle permet néanmoins d'illustrer comment des efforts destinés à maîtriser la croissance de la demande de transport peuvent contribuer (ou non) à s'extraire de certaines contraintes associées à la disponibilité de ressources en biomasse et à l'augmentation de la consommation électrique.

¹ Ne sont pas intégrés ici les travaux de CGDD/Pochez et al. [8] car datant de 2016.

2.1.1. Transport passager

Au-delà des changements de comportement des citoyens, l'évolution de la mobilité des passagers et du parc automobile français pourra notamment être contrainte par deux mesures réglementaires déjà annoncées :

- d'une part, la mise en œuvre des Zones à Faibles Emissions - mobilité (ZFE-m) dès 2025,² qui interdira aux véhicules les plus polluants de circuler dans les centres des plus grandes métropoles et autres grandes villes régulièrement terrains de dépassements des seuils de pollution.

- d'autre part, l'interdiction au niveau européen de la vente de véhicules thermiques neufs à partir de 2035.

Ces mesures auront pour effet d'accélérer la diffusion des véhicules polluants peu (critair 1, voire critair 2) ou pas (véhicules électriques) dans un premier temps (notamment en milieu urbain). A terme, c'est la diffusion totale (i.e. 100% des ventes) des véhicules électriques qui est espérée.

Certains éléments peuvent toutefois venir nuancer ces éléments et prévisions. En effet, ces objectifs ne seront pas nécessairement atteints aux horizons fixés ; il peut donc être nécessaire d'étudier quelles seraient les conséquences si ces mesures n'étaient finalement pas mises en œuvre (ou plus tard qu'envisagées). Par ailleurs, en l'état, il est considéré dans le texte de loi européen que les véhicules hybrides neufs ne pourront plus être vendus au-delà de 2035. Il peut donc être, là encore, utile de regarder ce qui se passerait si on laissait encore un peu de flexibilité sur cette catégorie de véhicules, sachant qu'un usage efficace des PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) nécessite des changements comportementaux. Enfin, la criticité de certains matériaux (eg. le lithium), pourra entraîner une augmentation des prix (de certains composants et donc des véhicules), limitant, de fait, la pénétration des véhicules électriques sur le marché.³

▪ Demande en mobilité des passagers

La hausse de la demande de mobilité individuelle se poursuit mais est atténuée par quelques évolutions des comportements tel qu'une diffusion de la pratique du télétravail susceptible d'entraîner une réduction de la mobilité domicile-travail (à distribution équivalente des populations et des emplois).⁴

En comparaison avec les autres exercices de prospective cités précédemment, le taux de croissance annuel (0,66%) est assez proche de celui de la SNBC et inférieur à celui du scénario tendanciel de l'ADEME (Figure 2).

² Actuellement, 11 métropoles ont mis en place une ZFE-m. D'ici 2025, toutes les agglomérations de plus de 150000 habitants devront en avoir instauré une. Néanmoins, un récent rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable relatif aux zones à faibles émissions mobilité (ZFE-m), par le sénateur P.Tabarot évoque la piste d'un report à 2030 [9].

³ Notons qu'ici la mobilité autonome (voitures autonomes, petits véhicules autonomes sur rail pour desserte locale, robot-taxis, drones,...) est peu évoquée. L'apport potentiel de cette dernière à la décarbonation du transport pourrait être questionné. Toutefois, une des principales limites (ou un des principaux écueils) à ce développement sera la très forte consommation d'énergie par les data centers qui en résultera.

⁴ Le développement du télétravail n'entraînera pas nécessairement un « gain net » puisque la baisse de la mobilité domicile-travail peut être en partie compensée par d'autres (nouvelles) mobilités et par une dépense énergétique accrue au niveau des datacenters (visioconférence).

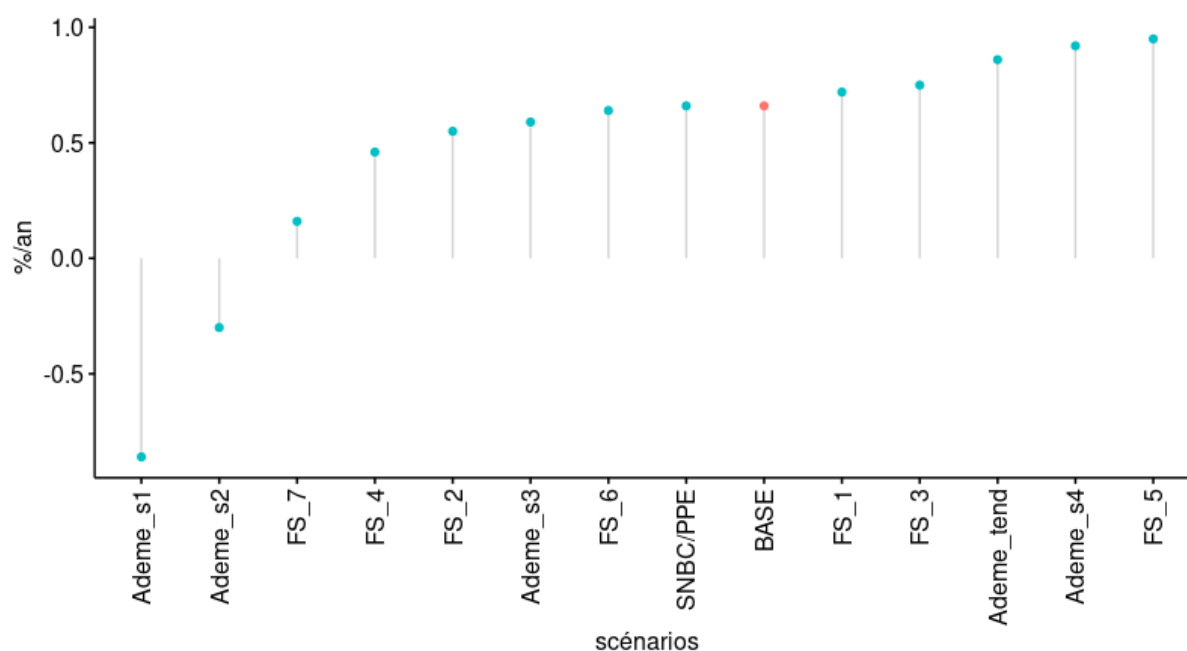


Figure 2. Taux de croissance annuel (à horizon 2050) des différents scénarios de demande de mobilité des passagers (exprimée en Gpkm)

note: Ademe_sx: scénarios 1 à 4 de l'ADEME [4], Ademe_tend: scénario tendanciel de l'ADEME [4]; FS_x : scénarios 1 à 7 de France Stratégie [5]; SNBC/PPE: scénario de la SNBC [1]; BASE: scénario de base de l'étude

■ Évolution technologique du parc de VP

L'évolution tendancielle d'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules thermiques se poursuit sans investissement R&D importants dans l'industrie. En ce qui concerne les véhicules hybrides, au-delà des améliorations technologiques prévisibles, les usagers seront incités à recourir plus souvent à l'usage du mode électrique qu'ils ne le font actuellement.

La plupart des scénarios de prospective postulent d'une électrification massive du parc automobile (e.g. environ 90% du mix énergétique pour les voitures particulières dans la plupart des scénarios de l'ADEME à horizon 2050). Néanmoins, ici, nous considérons plusieurs scénarios d'évolution de la composition du parc automobile afin d'illustrer la sensibilité de nos résultats à celle-ci.

Ainsi, les trois scénarios « technologiques » se distinguent essentiellement selon que l'objectif d'interdire la vente de voitures particulières neuves à motorisation thermique soit atteint ou pas et selon que cet objectif puisse être atteint en autorisant (ou pas) la vente de véhicules hybrides rechargeables et en autorisant la vente de véhicules thermiques n'utilisant pas de carburant d'origine fossile.

On distingue donc les trois cas suivants :

Parc électrique (scénario ELEC) : l'interdiction des ventes de voitures neuves à moteurs thermiques est appliquée en 2035 : la quasi-intégralité des voitures particulières vendues au-delà de cette date est à motorisation électrique⁵ ;

⁵ Le reste des ventes correspond à des véhicules à motorisation GPL, GNV ou FCEV.

Parc hybride (scénario HYB) : il est finalement autorisé de vendre des véhicules hybrides rechargeables neufs au-delà de 2035. A partir de cette date, les véhicules qui intègrent le parc automobile français sont pour la plupart des véhicules 100% électriques ou des véhicules hybrides rechargeables ;

Parc mixte (scénario THERM) : il est autorisé par dérogation la vente de véhicules neufs à motorisation thermique roulant avec des carburants 100% non fossiles au-delà de 2035. Le parc automobile est donc un 'mix' des technologies disponibles sur le marché (thermiques, électriques, hybrides, hybrides rechargeables, etc.) ...

On ne suppose pas ici d'évolution du taux de remplissage des différents modes de transport passager.

Cela conduit aux trois trajectoires suivantes pour la répartition technologique des véhicules-kilomètres parcourus par les véhicules particuliers:

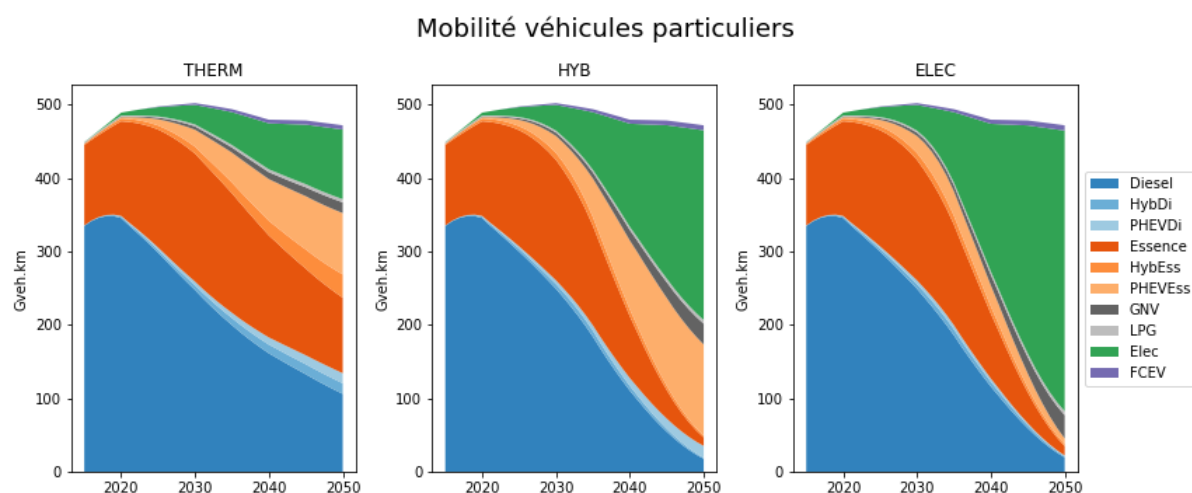


Figure 3. Mobilité des véhicules particuliers : milliards de véhicules-kilomètres parcourus suivant le type de motorisation

Concernant les autres catégories de véhicules, nous observons les tendances suivantes :

A relativement court terme, pour les bus, c'est la motorisation hybride qui se développe, en attendant la diffusion massive des bus électriques (sous réserve d'une disponibilité du réseau suffisante) à plus long terme. Il est à noter que le rythme de remplacement des flottes de bus sera fortement contraint par les disponibilités budgétaires des collectivités locales (i.e. bien que des technologies alternatives soient déjà disponibles, sans aides financières, il n'est pas possible d'accélérer le rythme de remplacement des flottes de bus existantes). Pour les déplacements longue distance, ce sont les cars à motorisation hydrogène qui se déploieront (sous réserve d'infrastructures de recharge suffisantes).

Dans le transport ferroviaire, les locomotives diesel sont supprimées à terme pour être remplacées lorsque cela est possible, par une motorisation hydrogène.

Par ailleurs, dans le secteur aérien, des actions seront mises en œuvre pour encourager le recours aux biokérosènes mais aussi aux e-fuels dont l'utilisation croît au fil du temps (voir Section 2.2 et Section 2.3).

▪ Évolution des parts modales

En milieu urbain, on observe une augmentation de la pratique des mobilités actives, i.e.. une hausse de la pratique de la marche, du vélo, de la trottinette. De même, on observe une augmentation de la fréquentation des transports en commun (sous contrainte de saturation de l'offre (matériel et infrastructure)). En milieu rural et pour les déplacements de plus longue distance, le recours à la voiture pour se déplacer reste majoritaire.

Dans le domaine du transport collectif, on observera une hausse tendancielle du recours au train. Cette tendance s'expliquera en partie par la réhabilitation d'anciennes lignes. Toutefois cette évolution se heurtera relativement vite (pour certaines lignes en tout cas) à la saturation des infrastructures.

Enfin, dans le transport aérien, on considère que la demande nationale ainsi que la consommation des routes internationales restent stables par rapport à la période 2015-2019.

L'évolution des parts modales, identique pour les 3 scénarios, est détaillée Figure 4.

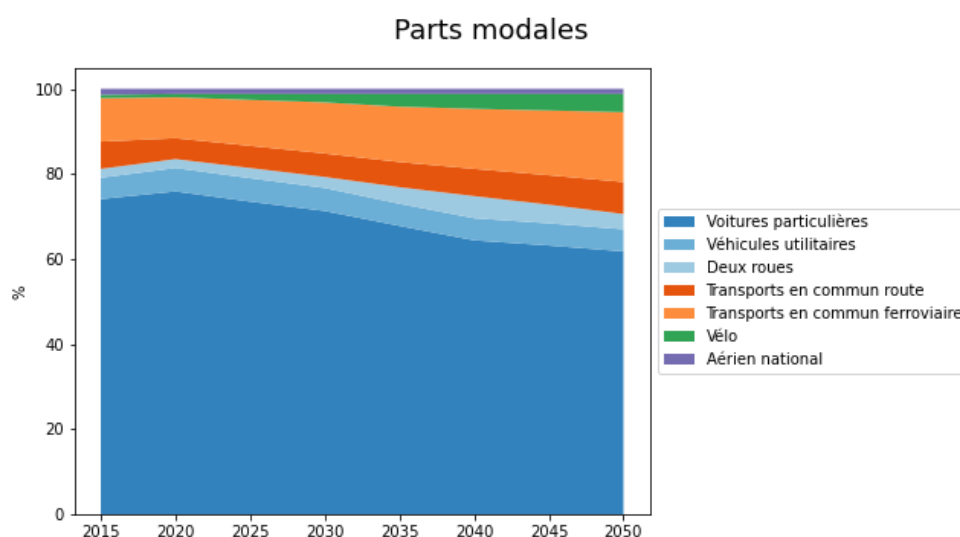


Figure 4. Parts modales du transport passager pour les trois scénarios (en % des Gpkm)

2.1.2. Transport de marchandises

Les décennies à venir se caractérisent par une évolution croissante des flux de marchandises, avec toujours une très forte domination des modes routiers (VUL, poids lourds...). Comme illustré par les précédents exercices prospectifs dans le domaine du transport de marchandises en France (eg. Briand et al. 2019 [6]), l'évolution de la demande de tonnes-kilomètres et les modes avec lesquels celle-ci sera opérée sont directement liés à l'évolution du système productif et des habitudes de consommation des ménages. Par ailleurs, il semble utile de distinguer ce qui est du ressort de la logistique courte distance ou urbaine de la logistique longue distance ; ces deux catégories de transport de marchandises ne correspondent pas aux mêmes volumes de marchandises (ni nécessairement aux mêmes types de marchandises) et ne sont pas associées aux mêmes contraintes opérationnelles, techniques (eg. autonomie) et réglementaires (eg. interdiction de certaines catégories de moteurs dans un objectif de réduction des pollutions locales ou d'apaisement du trafic en ville). Elles n'observent donc pas nécessairement les mêmes tendances et ne nécessitent pas obligatoirement le recours aux mêmes modes et/ou technologies.

Le secteur de la logistique va être, lui aussi, contraint par de plus grandes restrictions de circulation au sein des centres villes malgré une probable hausse de la demande de livraisons entraînée par la poursuite de la croissance des achats à distance. Pour les livraisons, cela pourrait se traduire par un plus grand recours à des cargo-bikes et véhicules électriques et à la mise en place de hubs de transfert de livraison à l'entrée des agglomérations. Pour le transport sur de relativement « courtes distances », le recours à des poids lourds électriques semblera également adapté.

Il n'est pas envisagé dans ce scénario d'évolution radicale des parts relatives des différents modes (routier, ferré, fluvial) dans le transport de marchandises opéré sur le territoire national. En effet, dans le cas du transport de marchandises, les modes utilisés sont fortement conditionnés par les contraintes opérationnelles, parfois difficiles à surmonter. Par ailleurs, notons que l'évolution du transport fluvial, elle, dépend notamment de la réalisation (ou non) du canal Seine-Nord-Europe, pouvant entraîner un report modal de la route vers le fluvial dans le nord de la France. Nous ne considérons donc pas ici des évolutions des parts modales du transport ferroviaire ou fluvial aussi importantes que cela peut être le cas dans certains autres scénarios prospectifs. Ce scénario, se situe dans la même perspective que le scénario 1 de l'étude publiée par l'IDDRI (Briand et al. 2019 [6]), à savoir une structure des échanges qui évolue peu et une décarbonation du transport de marchandises essentiellement mise en œuvre via la diffusion des technologies décarbonées (électrique pour la courte distance, électrique et hydrogène pour la longue distance).⁶

▪ Demande en transport de marchandises

Dans les trois scénarios, l'hypothèse est faite que l'économie française reste très imbriquée dans les chaînes de valeurs mondialisées, ce qui implique une poursuite de la croissance des échanges internationaux, dits de « longue distance ». Par ailleurs, la concentration de la population française dans (et autour) des grandes métropoles se poursuit, entraînant, sur le territoire métropolitain, une concentration des activités économiques dans ces bassins.

Il est fait l'hypothèse qu'aucun changement majeur dans le système d'échanges des marchandises n'est observé. Le développement du « e-commerce » contribue à développer l'augmentation des échanges rapides, tels qu'ils sont déjà observés. De plus, l'économie nationale se développe relativement plus sur les produits à forte valeur ajoutée. Ces faits pèsent fortement sur les choix des modes et véhicules de transport utilisés par les transporteurs et logisticiens.

Au final, la trajectoire retenue se caractérise par un taux de croissance annuel de 1,03%/an des tonnes-km, valeur proche de celles retenues dans un certain nombre de scénarios disponibles (par exemple la SNBC retient un taux de 0,96%/an et la plupart des scénarios étudiés par France Stratégie ont un taux de croissance situé autour de la valeur retenue ici) (Figure 5). A titre de comparaison, le taux de croissance annuel retenu est très supérieur à celui de la plupart des scénarios de l'ADEME (qui projette des taux négatifs dans ses scénarios S1 et S2).

⁶ Il est à noter qu'ici, contrairement à d'autres exercices prospectifs, aucune hypothèse n'est faite sur l'évolution de la demande relative de transport pour chacune des principales catégories de biens généralement retenues : produits manufacturés, produits agro-alimentaires, matériaux de construction, minerais / industriels.

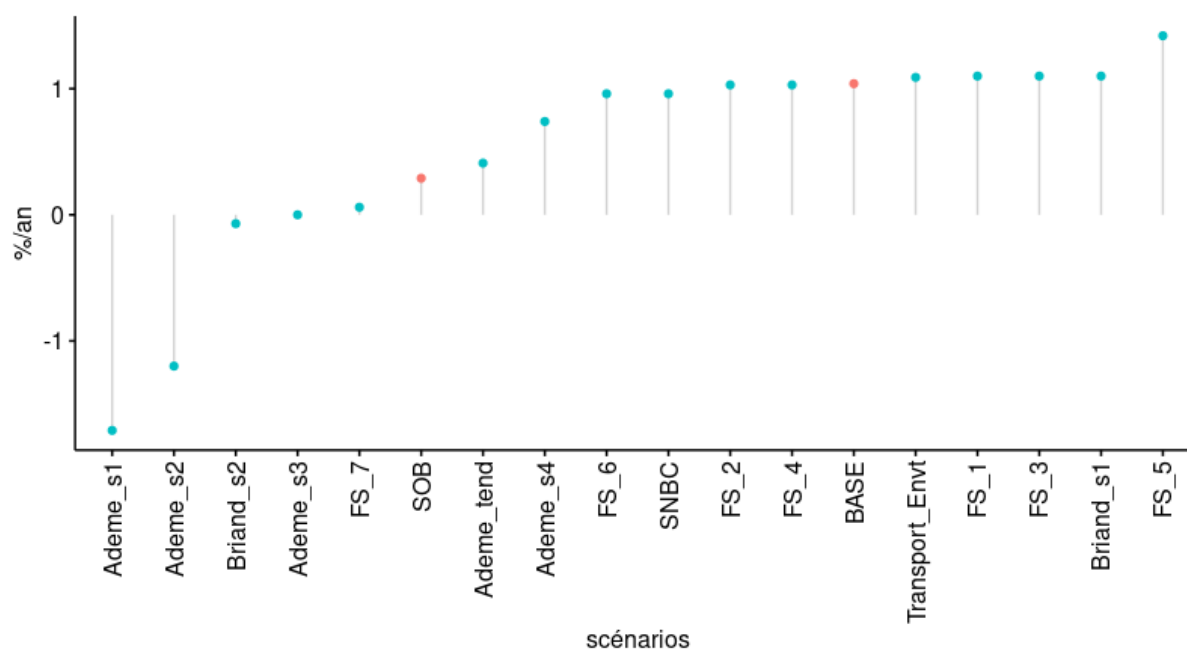


Figure 5. Taux de croissance annuel (à horizon 2050) des différents scénarios de demande de mobilité des marchandises

note: Ademe_sx: scénarios 1 à 4 de l'ADEME [4] ; Ademe_tend: scénario tendanciel de l'ADEME [4]; FS_x : scénarios 1 à 7 de France Stratégie [5]; SNBC: scénario de la SNBC [1]; Transport_Env: scénario de Transport & Environment [7]; Briand_sx: scénario 1 et 2 de Briand et al. (IDRRI) [6] ; BASE : scénario de base de l'étude ; SOB : scénario 'sobriété' de l'étude

■ Parts modales du routier, ferroviaire et fluvial

Il n'est pas ici fait l'hypothèse d'un développement de la part du ferroviaire et du fluvial très important pour les raisons déjà expliquées plus haut (i.e.. contraintes opérationnelles fortes). Toutefois, la part du transport ferroviaire est de plus de 12,7% en 2050, valeur légèrement inférieure à celle du scénario 1 de Briand et al. 2019 [6] (13%) ou du scénario S3 de l'ADEME (13,8%) mais supérieure à la part attendue dans le scénario tendanciel de l'ADEME (9,3%) (la part du fret ferroviaire était de 9% en 2010).

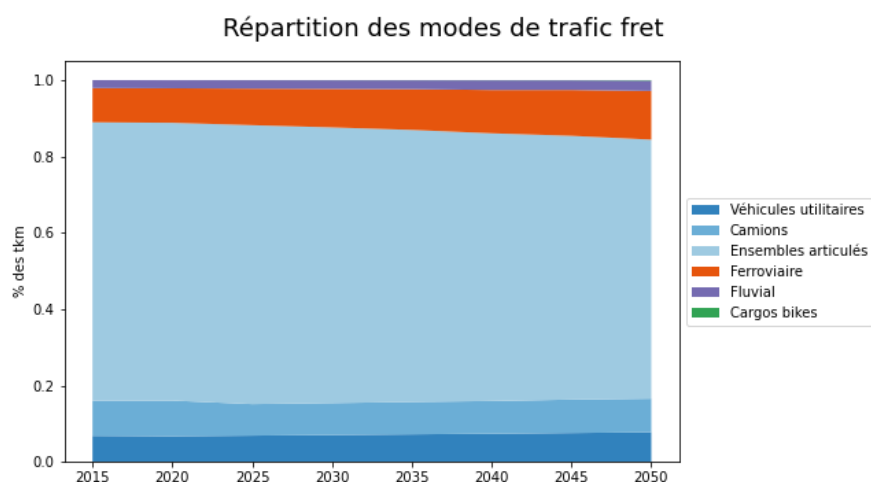


Figure 6. Répartition des modes de trafic du fret

Néanmoins, même si la part modale du fret ferroviaire évolue peu, étant donnée l'évolution de la demande globale de transport de marchandises, cela représente tout de même un quasi-doublement du nombre de tonnes-kilomètres transportées par le fret ferroviaire (i.e.. 62 milliards de tonnes.km). Même si cela représente une hypothèse assez forte du volume de marchandises transporté par le rail, qui situe notre trajectoire au-delà des scénarios de l'ADEME ou de la SNBC (52 milliards de tonnes.km pour une part modale de 12,4%) ; cela la situe à hauteur du scénario 1 de Briand et al. (2019) et assez nettement en deçà des scénarios « *Ambition de base* » et « *Neutralité* » de France Stratégie et du scénario 2 de Briand et al. (2019). Notons enfin, que les chiffres retenus sont inférieurs à ceux annoncés dans la stratégie nationale pour le fret ferroviaire, i.e.. 18% de part modale (correspondant à 60 milliards de tonnes.km) dès 2030 et 25% de part modale en 2050⁷.

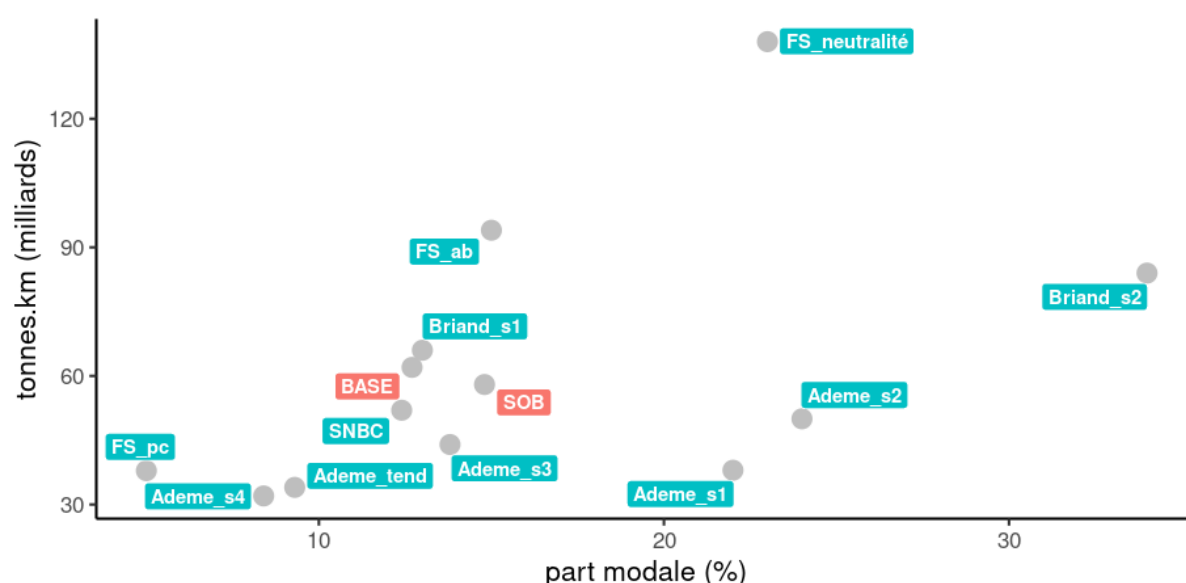


Figure 7. Part modale du transport ferroviaire en 2050 des différents scénarios de demande de transport de marchandises

note: Ademe_sx: scénarios 1 à 4 de l'ADEME [4] , Ademe_tend: scénario tendanciel de l'ADEME [4]; FS_x : scénarios 'neutralité', 'ambition de base' (ab), 'pire climatique' (pc) de France Stratégie [5]; Briand_sx: scénarios 1 et 2 de Briand et al. (IDDRI) [6] ; SNBC: scénario de la SNBC [1]; BASE scénario de base de l'étude ; SOB scénario 'sobriété' de l'étude

La part du transport fluvial de marchandises, elle, évolue peu; cette hypothèse est assez comparable aux hypothèses retenues dans la plupart des scénarios. Cela représente néanmoins une augmentation du transport de marchandises par voie fluviale de près de 7 milliards de tonnes-kilomètres parcourues à horizon 2050; valeur comparable à celle avancée par France Stratégie (2022) (expliquée par la liaison entre le bassin de la Seine et le réseau européen des voies navigables à grand gabarit rendue possible grâce au canal Seine-Nord-Europe).

⁷ Ministère chargé des transports. 2019. Stratégie nationale pour le développement du fret ferroviaire. Rapport, 77p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/210909_Strategie_developpement_fret_ferroviaire.pdf (consulté le 25 juillet 2023)

Les deux scénarios d'évolution technologique dans le secteur du transport de marchandises sont assez optimistes sur la diffusion des technologies alternatives (hydrogène et électrique) à horizon 2050. La part des tonnes-kilomètres transportées avec des véhicules à motorisation diesel est ainsi relativement faible (~20%) au terme de la période étudiée. Pour les transports à courte distance (logistique urbaine et transport intrarégional) le recours à la motorisation électrique est massif. Dans le cas des mobilités moyenne et longue distance, pour le remplacement des moteurs thermiques (essentiellement diesel), coexistent les motorisations hydrogène et électrique (i.e.. autoroutes électriques). La mise en œuvre de ces deux solutions suppose un investissement important des acteurs publics et privés (infrastructures de recharges pour la technologie, équipement des autoroutes électriques...).

On distingue les deux cas suivants :

Diffusion tendancielle (scénario THERM): Pour les transports de marchandises longues distances, la motorisation diesel reste, dans un premier temps, majoritaire. Sous l'effet des objectifs fixés au niveau européen, on observe toutefois une amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules neufs au cours des 10 prochaines années. On pourra toutefois voir se développer une flotte de poids lourds GNC (Gaz Naturel Comprimé), avant l'émergence d'une flotte de poids lourds hydrogène (sous réserve d'un réseau d'infrastructure de recharge adapté) et électriques (sous réserve d'investissement dans les autoroutes électriques).

Diffusion rapide (scénarios ELEC et HYB) : Les éléments de ce narratif pour le transport de marchandises sont très semblables à ceux évoqués dans le narratif tendanciel, si ce n'est que l'on observe une diffusion plus forte (et plus rapide) des poids lourds hydrogène pour les trajets relativement longs. De plus, des trains et péniches à hydrogène sont aussi intégrés progressivement aux transports ferroviaires et fluviaux.

Les trajectoires de pénétration des différentes technologies associées à ces scénarios pour le fret routier (cargo bikes, véhicules utilitaires, camions et ensembles articulés), le fret ferroviaire et le fret fluvial sont détaillées respectivement Figure 8, Figure 9 et Figure 10.

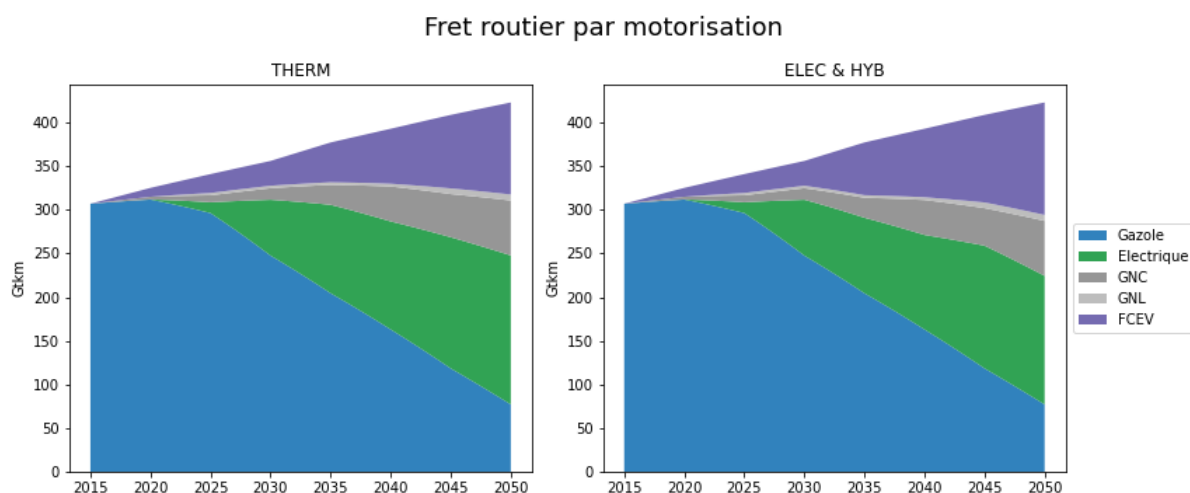


Figure 8. Evolution de la part des motorisations pour le fret routier suivant les scénarios

D'autres scénarios proposent une part assez faible pour le diesel. Néanmoins, dans un certain nombre de scénarios la substitution se fait par du GNV. Dans nos scénarios la substitution se fait essentiellement avec de l'électrique et dans une moindre mesure de l'hydrogène, ce qui semble cohérent avec ce qui est souvent supposé (cela s'explique entre autres par le fait que la motorisation électrique est envisagée aussi bien pour les courtes distances que pour les longues distances tandis que la motorisation hydrogène est plutôt envisagée pour le transport longue distance).

Pour le fret, les différences entre les variantes considérées sont moins marquées qu'elles ne le sont pour la mobilité passagère. Ces deux scénarios diffèrent légèrement par la part relative des motorisations électriques et hydrogène notamment.

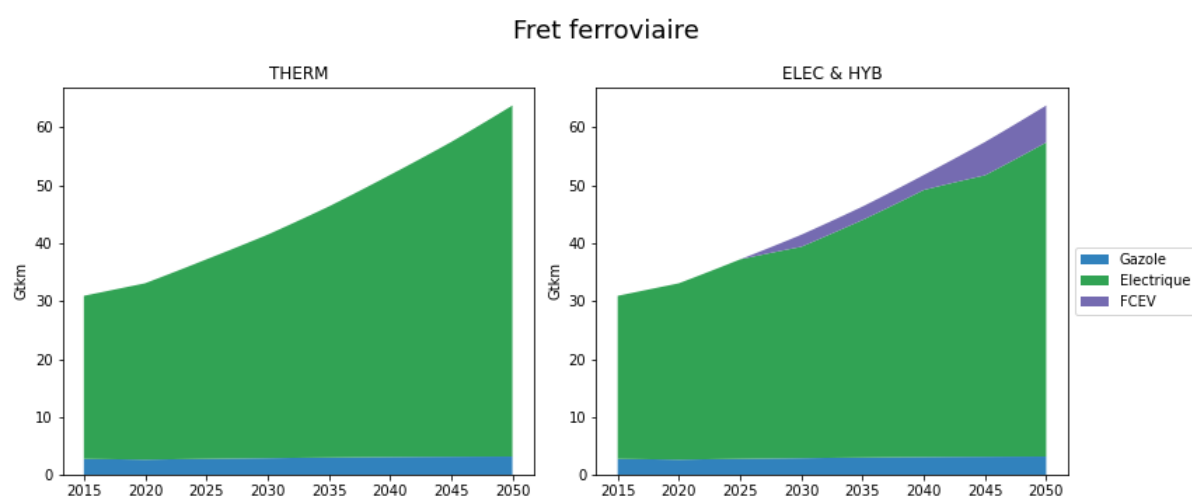


Figure 9. Evolution de la part des combustibles pour le fret ferroviaire suivant les scénarios

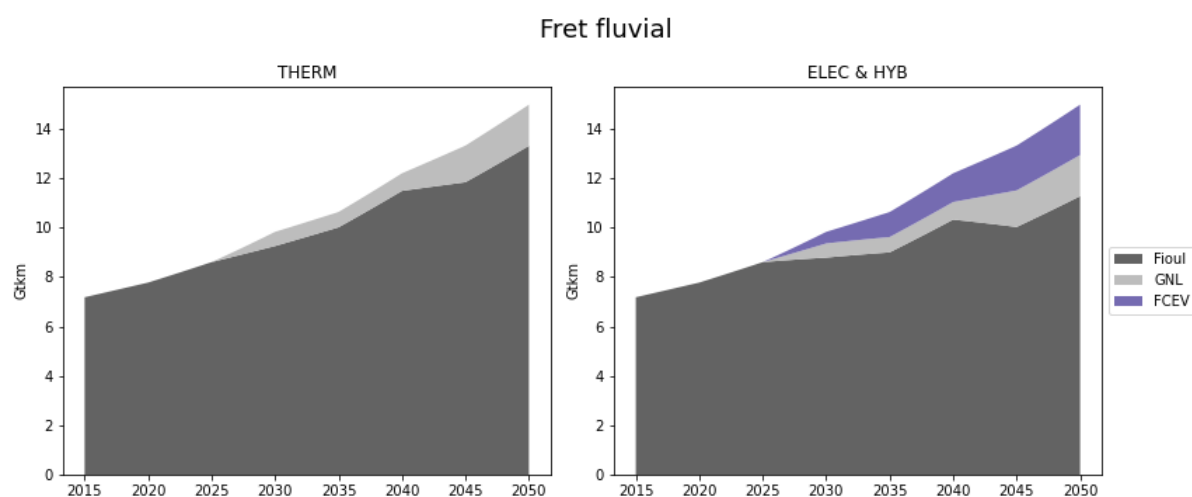


Figure 10. Evolution de la part des combustibles pour le fret fluvial suivant les scénarios

2.2. Hydrogène

Dans le secteur du transport, on considère deux usages possibles de l'hydrogène, d'une part l'utilisation directe dans les véhicules à pile à combustible (FCEV), et d'autre part l'utilisation d'H₂ pour la création de carburants synthétiques, e-fuels, visant à se substituer aux combustibles liquides dans les moteurs thermiques.⁸ Cet hydrogène doit être issu d'électricité bas carbone afin de réduire effectivement les émissions de CO₂.

La production d'hydrogène bas carbone passe par l'introduction croissante de l'électrolyse dans les procédés de fabrication. En 2020 10% de la production d'H₂ d'électrolyse était réalisée par électrolyse[10] (hors coproduction) ; les objectifs France Hydrogène et RTE, visent 100% à partir de 2030 (toujours pour la demande hors coproduction).

Les électrolyseurs installés ont un facteur de charge de 0.8, en effet on considère que ces électrolyseurs sont connectés au réseau avec un fonctionnement entre 6000 et 7000h par an, ce qui semble atteignable avec un mix de production d'électricité alliant nucléaire et renouvelables. Avec une part croissante d'électrolyseurs haute température dans le parc de production (dont le rendement pourra atteindre 40 kWh_{elec}/kgH₂), et une légère amélioration du rendement des électrolyseurs à basse température (jusqu'à 50 kWh_{elec}/kgH₂), on considère une évolution du rendement du parc d'électrolyseurs global de 55 kWh_{elec}/kgH₂ en 2020 à 45 kWh_{elec}/kgH₂ en 2050.

Pour les e-fuels, l'hydrogène sera utilisé pour produire e-kérosène, e-diesel et e-essence grâce au procédé Fischer-Tropsch. Ces trois carburants sont en effet produits au cours de la même réaction. Au-delà d'un sous-objectif d'incorporation globale de RFNBO⁹ dans l'ensemble des énergies du secteur transport dans la Directive Energie Renouvelables REDII en cours de révision, la principale régulation sectorielle existante en Europe porte sur l'introduction dans le transport aérien de Sustainable Aviation Fuel (SAF). Les objectifs liés à la loi ReFuelEu Aviation [11] sur les taux d'incorporation sont présentés dans le Tableau 1.

	Sustainable aviation fuels	Dont e-kérosène	Dont biokérosène
2025	2%	0%	2%
2030	5%	1.2%	4.8%
2035	20%	5%	15%
2040	34%	10%	24%
2045	46%	19%	27%
2050	70%	35%	35%

Tableau 1. Objectifs d'incorporation européens de carburants durables dans le secteur aérien considérés à avril 2023

⁸ Il est à noter que le moteur à combustion interne H₂, non cité ici, est également évoqué comme une piste prometteuse pour la mobilité décarbonée.

⁹ RFNBO : Renewable Fuels of Non Biological Origin, correspondant aux différentes formes d'e-fuels renouvelable et à l'hydrogène renouvelable

Si ces objectifs sont actuellement uniquement au niveau de l'Europe, on fait l'hypothèse que la contribution des acteurs industriels français suivra ces obligations européennes et que les taux d'incorporation dans les soutes françaises suivront les mêmes tendances qu'à l'échelle européenne. On considère ainsi dans nos scénarios que c'est la demande en e-kérosène qui va conditionner la disponibilité des e-diesel et e-essence incorporables dans les pools gazole (routier, non routier, fluvial, maritime) et dans le pool essence respectivement.

En plus de la demande nationale effective de kérosène (trajets métropole/métropole, métropole/outr-mer et outr-mer/outr-mer), d'environ 1,3 Mtep en 2019, on considère aussi dans nos scénarios les soutes internationales de kérosène (environ 5,7 Mtep/an) pour estimer l'incorporation de ces substituts. Les soutes internationales sont les consommations des avions assurant les liaisons internationales.

Même si les émissions associées à ces soutes ne sont pas comptabilisées dans l'inventaire national de l'Accord de Paris et de la SNBC, la production physique, associée à la demande totale de carburants de substitution tiendra compte de ces volumes lors du dimensionnement de la filière, ce qui induit une utilisation de ressources supplémentaires (électricité ou biomasse) pour la production de ces SAF internationaux.

Dans la suite de l'étude nous faisons l'hypothèse d'une demande stable en kérosène au cours du temps et l'hypothèse que la réponse à la demande nationale et soutes internationales se ferait par une production en France. Il faut cependant apporter deux nuances.

- Les scénarios envisagés par certaines ONG (Shift Project, Transport & Environnement), par les organisations professionnelles (IATA, OACI, ATAG) avec le CORSIA ou par les parties institutionnelles (Haut Conseil pour le Climat, France Stratégie, ADEME), conduisent à des situations 2050 dans lesquelles le trafic aérien est réduit de manière drastique ou multiplié jusqu'à un facteur 2. A titre d'exemple l'étude de l'ADEME envisage des scénarios 2050 de stabilité ou de doublement du trafic par rapport à 2019 et introduit une réduction des émissions due à une meilleure efficacité.
- La réglementation européenne (ou américaine ou chinoise) sur la certification du carbone et de l'électricité pourrait avoir un impact fort qui conduirait à ne pas répondre à la demande sur le territoire national. Même en cas de production sur le sol européen, la production sur le sol Français n'est pas assurée.

Il faut donc prendre les estimations avec prudence car le cumul des hypothèses pourrait conduire à deux situation extrêmes : l'augmentation forte de la production de kérosène à 2050 (augmentation du trafic et production en France) ou réduction importante (possiblement à zéro si le kérosène est produit à l'étranger et importé). Au milieu, plusieurs scénarios seraient envisageables. L'objet de l'étude n'étant pas une analyse de sensibilité des scénarios de l'aviation, sur la production de carburant, nous avons donc travaillé à partir d'une première hypothèse de stabilité de la demande en kérosène.

Pour dimensionner le taux d'incorporation de e-diesel dans le pool gazole on considère ensuite deux stratégies distinctes de répartition des produits en sortie du procédé Fischer-Tropsch suivant nos scénarios (les hypothèses de répartition des coupes en sortie de procédé pour chaque stratégie sont détaillées dans le Tableau 2) :

- Pour le scénario ELEC et HYB, étant donné la faible quantité de diesel restante dans le parc de véhicules, on cherchera à maximiser la production d'e-kérosène en sortie de procédé. La

répartition des 3 coupes carburants correspond ainsi à un rendement du procédé visant à maximiser la coupe kérosène. Ainsi en 2050 cela conduirait à une incorporation d'environ 20% d'e-diesel dans le mix de carburants répondant à la demande en gazole routier.

- Pour le scénarios THERM, la quantité nécessaire de diesel en 2050 reste importante, on cherche donc à maximiser la production de e-diesel en sortie de procédé. Une partie de cet e-diesel pourra être valorisée à hauteur d'environ 1 Mtep en substitut dans les secteurs non routiers (engins non routiers, transport fluvial, transport maritime). Cela conduit à une incorporation d'environ 56% d'e-diesel dans le gazole routier.

	Scénarios ELEC et HYB	Scénarios THERM
E-kérosène	50 %	25%
E-diesel	25 %	63%
E-essence	25 %	12%

Tableau 2. Hypothèses de répartition des différentes coupes de carburants en sortie de procédé Fischer-Tropsch suivant les stratégies adoptées dans les 3 scénarios

Enfin pour le taux d'incorporation d'e-essence, on considère en 2050 une incorporation d'environ 15% d'essences synthétiques issues des naphtas produits par les procédés e-fuels de type FT. On retrouve ce type d'hypothèses dans plusieurs exercices prospectifs visant la neutralité carbone¹⁰ dans le transport routier considérant l'incorporation d'éthanol à haute teneur dans des motorisations essence ou hybride Flex-fuel, complétée par différentes essences de synthèse de type HVO, FT ou méthanol-to-gasoline.

Aux vues des quantités de e-kérosène à produire, la production effective de naphtas par Fischer-Tropsch risque d'être bien plus importante que les 15% prévus dans le pool essence du secteur transport, mais cette partie supplémentaire coproduite pourra être utilisée par d'autres secteurs, tels que la pétrochimie et la production de plastiques par exemple.

La répartition totale des différents substituts de type e-fuels est synthétisée dans la Figure 11.

¹⁰ Scenarios ADEME Transitions 2050 publié en 2022 [4], et exercice interne IFPEN réalisé à l'échelle européenne sur la base des projections de parcs automobiles de la PFA [12].

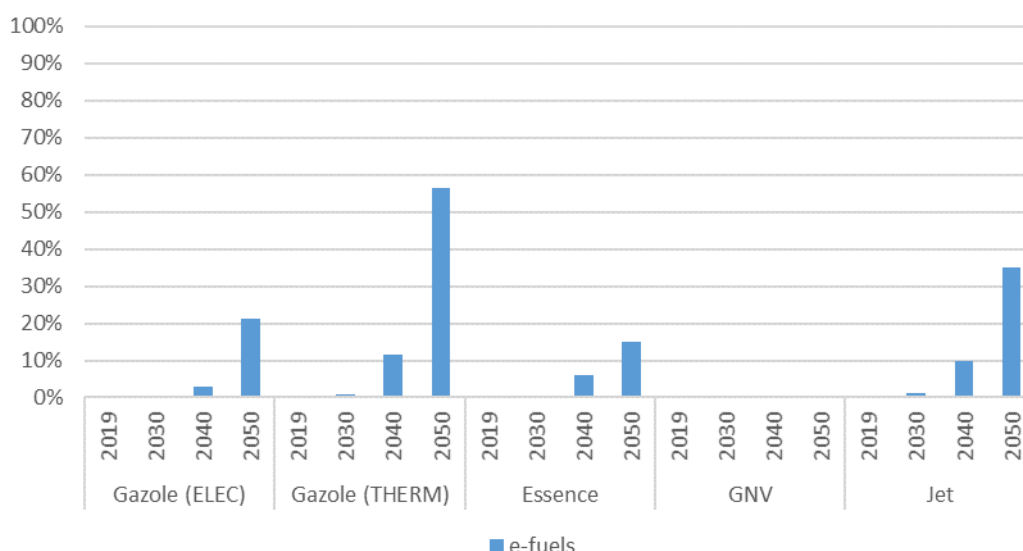


Figure 11. Trajectoires d'évolution des taux d'incorporation (PCI) e-fuels aux carburants des motorisations thermiques

Dans nos 3 scénarios, on ne considère pas d'augmentation de la consommation d'électricité liée à la capture et au stockage du CO₂, nécessaire à la production d'e-fuels, ni de problème de disponibilité de ce CO₂. Suivant la méthode utilisée (captage à la source, « direct air capture » (DAC)) les consommations électriques associées peuvent en effet varier significativement. **Il est choisi ici de ne pas considérer cette consommation dans le secteur transport.**

2.3. Biomasse

La biomasse est actuellement la première source d'énergie renouvelable en France et est donc une ressource clé pour l'objectif de neutralité carbone. Cependant la ressource est utilisable en quantité limitée et il existe des risques de compétitions d'usages entre les différents usages énergétiques, avec l'ensemble des usages de la bioéconomie, dont en tout premier lieu l'alimentation, et avec d'autres services écosystémiques (maintien de la biodiversité, des stocks de carbone, etc.).

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse principalement à son utilisation pour des usages sous forme de biocarburants et l'impact de nos scénarios du secteur transport sur la ressource disponible.

2.3.1. Ressources considérées

Pour les différentes sources de biomasse (agricoles, bois, déchets organiques urbains et de l'agro-industrie, algues), un groupe de travail du GP1 de l'ANCRE a permis de définir des trajectoires de potentiels mobilisables pour l'énergie à horizon 2050. Ce groupe de travail était composé de Monique Axelos (INRAE), Loic Monod (FranceAgriMer), Lorie Hamelin (INSA Toulouse), Jean-Pierre Petit (MAA), Daphné Lorne (IFPEN) pour la biomasse agricole ; Alain Thivolle-Cazat (FCBA), Philippe Français-Demay (MAA), Alexandra Niedzwiedz (INRAE), Sylvain Cauria (INRAE), Lorie Hamelin (INSA Toulouse), Guillaume Boissonnet (CEA), Daphné Lorne (IFPEN), pour la biomasse bois ; Jean-Philippe Steyer (INRAE), Olivier Bernard (INRIA), Jean-François Sassi (CEA), Philippe Michaud (CNRS-UCA), Philippe

Potin (SB Roscoff), Jack Legrand (CNRS-GEPEA) pour la biomasse algale. Les échanges se sont déroulés sur 2020-2021 et ont permis d'aboutir au chiffrage de trajectoires de disponibilité en biomasses pour l'énergie à horizon 2050 pour la France. Les hypothèses et résultats obtenus sont synthétisés dans les paragraphes suivants.

■ *Biomasses agricoles*

Le potentiel maximum de mobilisation de ressources agricoles alimentaires mobilisées pour l'énergie, à savoir les céréales (principalement blé, orge, maïs), les oléagineux (colza, tournesol), et la betterave sucrière est ici limitée à son niveau d'utilisation actuel pour la production de biocarburants (à l'année 2019). Cette hypothèse est basée sur un article de la Directive Européenne sur les Energies Renouvelables REDII qui impose pour chacun des Etats Membres un seuil maximum d'incorporation de biocarburants conventionnels ou « 1^{ère} génération » (issus de ressources alimentaires) de 7% de la consommation d'énergie des transports à 2030. La France ayant aujourd'hui atteint ce seuil, il a ici été considéré de stabiliser les volumes mobilisés sur la base des statistiques observées en 2019.

D'ici à 2050 on voit apparaître de nouvelles ressources agricoles mobilisables sans concurrence directe avec les usages alimentaires et faisant partie des biomasses listées en annexe IX-A de la directive REDII [13] en mesure de produire des biocarburants « avancés ». Parmi elles, on considère la biomasse cultivée en CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique), les cultures lignocellulosiques pérennes (comme le miscanthus ou les taillis à courte rotation par exemple) ainsi que les surplus de résidus de récolte (de céréales, d'oléagineux) et de taille de vergers et vignes. Pour ces nouvelles ressources, compte-tenu d'un certain nombre d'incertitudes sur les contraintes économiques et environnementales de mobilisation de ces ressources, il a été défini une trajectoire « min » et une trajectoire « max » de disponibilité de chacune de ces ressources. Ces trajectoires sont illustrées graphiquement ci-dessous et un tableau des valeurs actuellement mobilisées et des potentiels 2050 estimés est détaillé en Tableau 14 en annexe 1.

Sans regard expert spécifique sur le potentiel des **cultures intermédiaires à vocation énergétique** (CIVE) il a dans cet exercice été choisi de reprendre les évaluations réalisées dans d'autres travaux et en particulier (1) l'étude France Stratégie de juillet 2021 [14] qui indique une fourchette min-max de disponibilité des CIVE à horizon 2030 ; (2) l'étude ADEME-GRDF-GRTgaz de 2018 [15] qui indique des tonnages de CIVE d'hiver et de CIVE d'été disponibles à horizon 2050. Nous avons ici fait le choix de retenir le chiffrage des deux types de CIVE pour définir notre potentiel « max » 2050, ainsi que l'unique chiffrage des CIVE d'hiver pour le potentiel « min » à 2050 (les CIVE d'été ayant des rendements moins élevés, cela d'autant plus que l'effet du changement climatique sera plus marqué, et des coûts de revient plus élevés que les CIVE d'hiver).

Concernant les **résidus de récolte agricoles et de tailles de vergers et de vignes** des hypothèses de taux d'exportation des résidus des parcelles pour valorisation énergétique ont été définies sur la base des tonnages totaux produits et observés en 2019. L'ensemble des hypothèses sont issues du rapport de l'Observatoire National des Ressources en Biomasse publié en 2020 par FranceAgriMer [16]. Une trajectoire min et une trajectoire max ont ici été définies pour les seules pailles de céréales compte tenu des incertitudes sur l'évolution des conflits d'usages avec les activités d'élevage et des autres usages non alimentaires.

Enfin le potentiel de déploiement des **cultures lignocellulosiques pérennes** a été défini sur la base d'un chiffrage des surfaces allouables à ce type de cultures à 2050 associé à un rendement moyen national de 15 tonnes de matières sèches par hectare à ce même horizon. Parmi ces surfaces sont considérées :

- une part min (2%) et max (5%) de la Surface Agricole Utile des exploitations (soit entre 0,54 et 1,34 millions d'hectares),
- une part de 25% des surfaces de friches industrielles et commerciales considérées comme re-végétalisables et estimées dans le cadre du projet « Puits de carbone » de l'ANCRE publié fin 2022 [17] (soit entre 0,13 et 0,18 millions d'hectares),
- une part de 25% des surfaces végétalisées aux abords des infrastructures de transport (aéroport, voies ferroviaires, bordures de routes, etc.), également estimées dans le projet « Puits de carbone » et considérée uniquement pour une trajectoire « max » (soit 0,11 millions d'hectares).

Pour les besoins du calcul, les trajectoires d'accroissement entre 2019 et le potentiel estimé à 2050 ont été discrétisées avec des polynômes de degré 1, 2 ou 3 selon que la cinétique prévisible est plus ou moins grande en début et en fin de trajectoire. Les trajectoires résultantes sont représentées en Figure 12. Elles restent une hypothèse du calcul à partir de dire d'expert et peuvent être modifiées, comme un paramètre du modèle, si nécessaire.

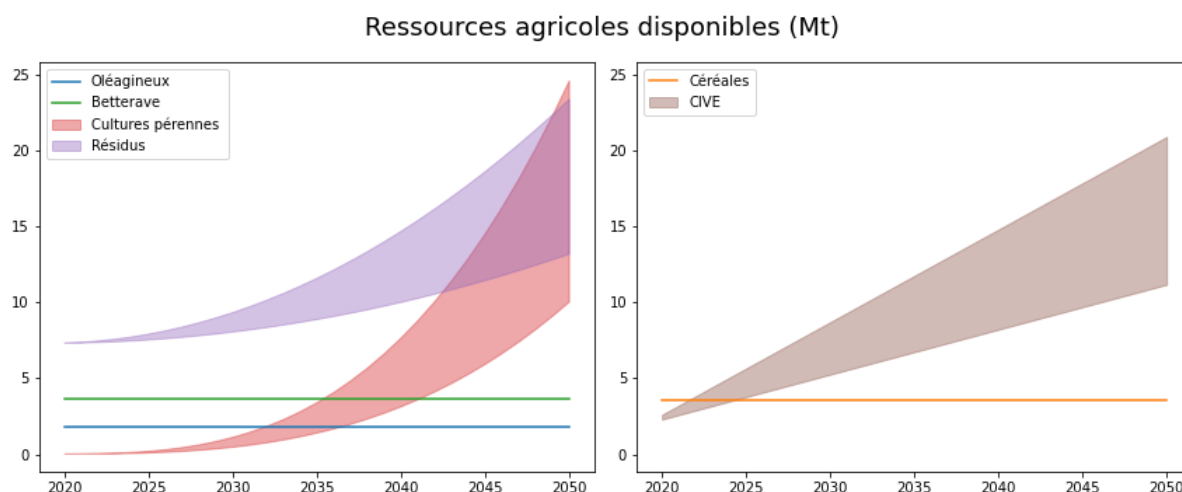


Figure 12. Evolution des quantités de biomasse agricoles disponibles

■ Biomasses Bois

Parmi les ressources bois valorisables en bioénergies nos trajectoires considèrent : (1) des résidus de l'exploitation forestière, (2) des résidus de la 1^{ère} et 2^{ème} transformation du bois pour la production de bois d'œuvre et d'industrie, (3) des résidus issus de l'entretien des haies et de l'agroforesterie, (4) des bois en fin de vie issus des déchetteries. L'ensemble de ces ressources fait aujourd'hui partie des biomasses listées en annexe IX-A de la directive REDII en mesure de produire des biocarburants « avancés ».

Les trajectoires de disponibilité des **résidus de l'exploitation du bois en forêt** ont été définies sur la base du rapport ADEME-IGN-FCBA de 2016 [18]. Des projections à 2050 ont été définies à dire d'expert par le groupe de travail ANCRE composé de membres du FCBA, d'INRAE et du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. La trajectoire « min » comprend les menus bois et bois BIBE (Bois d'Industrie et Bois Energie) du scénario « tendanciel » de l'étude ADEME projeté à 2050, auxquels sont retranchés les demandes en bois du secteur panneau considéré en croissance à 2050 ainsi que les demandes en bois du secteur papier considéré comme stable à 2050. La trajectoire « max » comprend les menus

bois et bois BIBE du scénario « dynamique progressif » de l'étude ADEME projeté à 2050, auxquels sont retranchés les demandes en bois du secteur panneau considéré comme stable à 2050 et auxquels sont additionnés du bois du secteur papier considéré en décroissance à 2050 (soit l'équivalent de l'approvisionnement en bois d'une des 5 papeteries françaises actuellement en opération, soit 20% de l'approvisionnement en bois du secteur papier actuel).

Les **résidus de la transformation du bois** font l'objet d'une unique trajectoire comprenant les connexes du bois d'œuvre tels qu'ils sont actuellement valorisés en énergie (statistiques SSP, chiffres et données 2019) ainsi que les connexes de papeterie.

Les **bois issus de l'entretien des haies et arbres d'agroforesterie** ont été estimés par l'étude France Stratégie de 2021. Enfin les **bois en fin de vie** avaient fait l'objet d'une estimation lors d'une précédente étude ANCRE sur les « scénarios facteurs 4 à 2050 » [3] et définis sur la base des statistiques de production de bois de rebut et recyclé par habitant (5,4% en 2019) et en considérant une augmentation de la population nationale qui atteindrait 70 millions d'habitant en 2050.

Le graphique suivant illustre les trajectoires de disponibilité des différents types de ressources bois. Le détail des données est disponible en Annexe 1 : Hypothèses de disponibilités Min/Max à horizon 2050 des biomasses agricoles et biomasses bois à vocation énergétiques.

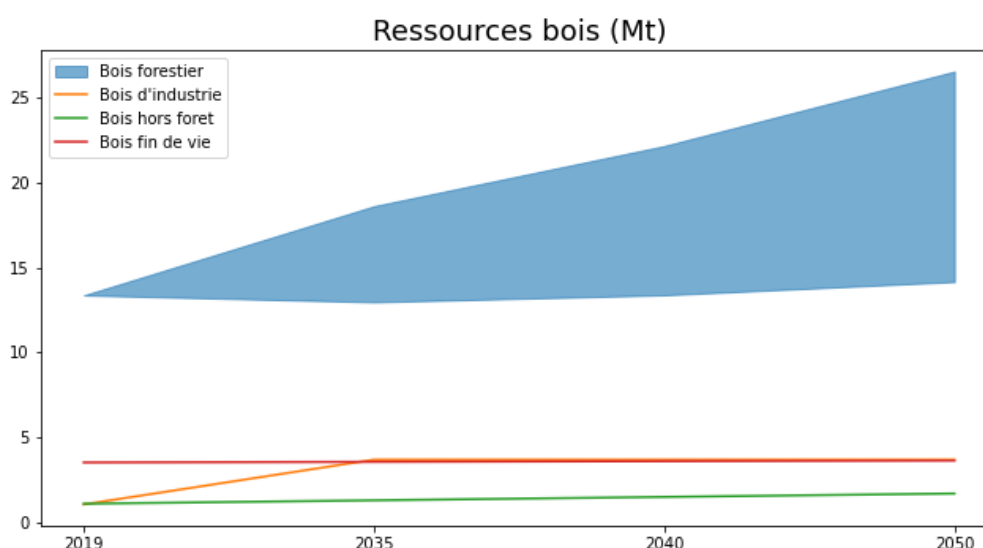


Figure 13. Evolution des quantités de biomasse forestière disponibles

▪ Déchets organiques et sous-produits de l'agro-industrie

Parmi les déchets organiques valorisables par les filières bioénergies on considère ici (1) les huiles et graisses végétales et animales usagées, (2) les sous-produits du raffinage des huiles végétales (huiles acides et autres effluents d'huilerie), (3) les résidus de sucrerie (sucres non extractibles ou égouts pauvres), de la production d'alcool (alcool vinique) et d'amidonnerie (amidon résiduel), (4) la part organique des combustibles solides de récupération (CSR), (5) les déchets fermentescibles pour la production de biogaz (effluents d'élevage, boues de STEP, biodéchets urbains). Le statut de ces différents déchets vis-à-vis des catégories REDII sont en cours de redéfinition. Dans le texte actuellement en vigueur seule la catégorie (1) appartient aux ressources de l'annexe IX-B limitée par un seuil d'incorporation maximum, tandis que les autres catégories font partie des biomasses listées en annexe IX-A de la directive REDII en mesure de produire des biocarburants « avancés ».

Le chiffrage du potentiel de ces différentes ressources est issu d'une revue bibliographique et de dire d'expert. Les disponibilités maximum nationales de sous-produits de l'industrie agro-alimentaires valorisables en biocarburant liquides (catégories (1), (2), (3)) ont été définis par les acteurs industriels du secteur (Total Energies, Cristal Union et SNPAA). A noter qu'aujourd'hui ces ressources sont pour certaines mobilisées en plus grande quantité que le potentiel de collecte nationale via le recours aux importations. Au même titre que pour les importations d'huiles végétales historiquement pratiquées, le recours aux importations d'huiles déchets restera autorisé dans ces scénarios dans la mesure des limites règlementaires d'incorporation actuellement en vigueur pour les biocarburants « conventionnels » et « autres » issus des ressources listées à l'annexe IX-B de la directive REDII). Le chiffrage des CSR (4) a été réalisé par une étude ADEME 2016 [19].

Types de résidus industriels	Voies de valorisation	stat 2021 avec imports	2030 sans import	2050 sans import
Huiles végétales usagées (en Mt d'huile)	EMAG, HVO	0,140	0,172	0,172
Graisses animales (en Mt d'huile)	EMAG, HVO	0,071	0,163	0,163
Huiles acides (en Mt d'huile)	EMAG, HVO	0,028	0,070	0,070
Résidus amidonniers (en Mt éthanol)	Ethanol	0,011	0,150	0,160
Alcool vinique (en Mt éthanol)	Ethanol	0,052	0,032	0,032
Sucres non extractibles (en Mt éthanol)	Ethanol	0,137	0,165	0,300
CSR (en Mt) (dont 50% organique)	Combustion, BtL	0	3,300	3,300

Tableau 3. Statistiques 2021 des résidus industriels et potentiels à 2030 et 2050

Le chiffrage des déchets fermentescibles pour la production de biogaz par méthanisation est issu, pour les biodéchets urbains et les déchets verts, d'une étude ADEME 2013 [20], pour les effluents d'élevage et les coproduits de l'industrie agroalimentaire, d'une étude FranceAgriMer 2022 [21], et pour les boues de STEP, d'un rapport SIA Partners 2019 [22]. Une seule trajectoire a été définie pour ces catégories de biomasses à l'horizon 2050.

	Stat mobilisation 2021	Disponibilité totale estimée
Effluents d'élevage (en Mt MB)	23,3	131,6
Coproduits des Industries agroalimentaires (en Mt de MB)	7,4	16,8
Boues de STEP (en Mt de MB)	1,1	5,28
Déchets ménagers et biodéchets	0,9	13,7
Déchets verts		4,8

Tableau 4. Statistiques de consommation et potentiel de mobilisation des déchets méthanisables pour la production de biogaz par méthanisation

▪ Algues

Les microalgues sont une ressource dont l'utilisation actuelle pour l'énergie est quasi-nulle. Cependant, il existe un potentiel à 2050 pour la valorisation sous forme de biocarburants avancés.

Le potentiel est calculé à partir de l'étude « Evaluation du potentiel de production de microalgues en France en 2030 » de l'ADEME-INRIA-ENEA [23], basé sur l'outil de simulation In@lgae, qui permet de déterminer la productivité en microalgues en fonction de la localisation, de la saison, de l'espèce et du procédé de culture. La localisation tient compte de la présence de CO₂ industriel et d'eaux résiduaires contenant de l'azote et du phosphore. L'objectif a été de déterminer la surface en France pour cultiver des microalgues et de déduire, en fonction de différents scénarii, la production annuelle. Les surfaces potentielles sont estimées à environ 150000 ha pour les raceways (RW) et à 250000 ha pour les photobioréacteurs (PBR). La productivité estimée est de 14g/m²/j pour les RW et 25 g/m²/j pour les PBR avec une production sur 9 mois. On estime pouvoir exploiter entre 10 et 30% de cette surface.

Cela nous conduit à considérer 2 trajectoires extrêmes de production de microalgues : une trajectoire « min », avec environ 0,6 Mt/an de biomasse algale sèche, en prenant 10% des surfaces potentiellement intéressantes pour cultiver des microalgues en raceways, et une trajectoires « max » avec 5 Mt/an de biomasse algale sèche, en prenant 30% des surfaces potentiellement intéressantes pour cultiver des microalgues en photobioréacteurs.

De manière similaires aux autre ressources biomasse, les trajectoires d'accroissement entre 2019 et le potentiel estimé à 2050 ont été discrétisées avec des polynômes pour les besoins du calcul (voir Figure 14).

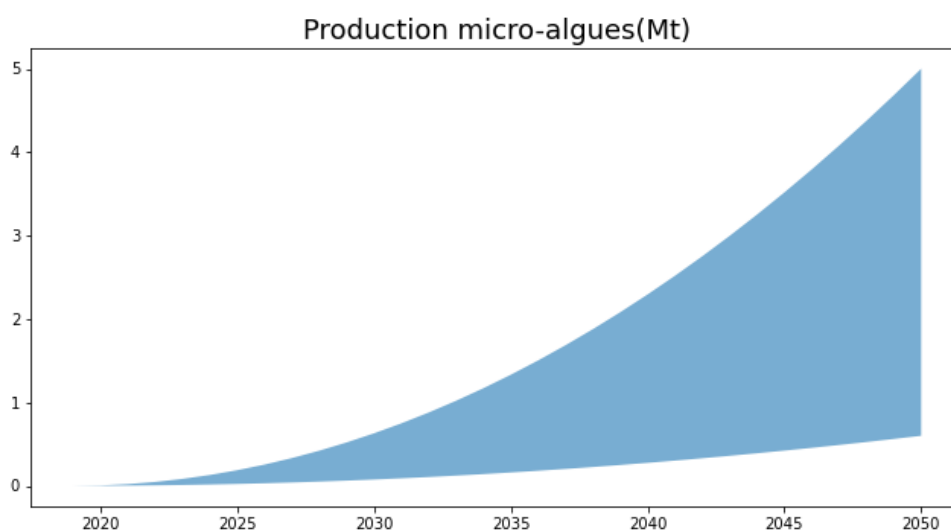


Figure 14. Potentiel de production des microalgues

Les macro-algues peuvent également dans certains cas être valorisées pour la production d'énergie, notamment via des procédés de conversion pyrolytiques. D'après la même étude de l'ADEME-INRIA-ENEA, on estime entre 6 et 13 Mt/an la production de macroalgues en tenant compte de la récolte (14 kt/an), de l'algoculture sur les espaces conchylicoles (50 kt/an), de l'algoculture sur des parcs éoliens offshore (0,6 Mt/an) et sur l'algoculture à terre (6 à 12 Mt/an). Sachant que la production annuelle mondiale d'algues, destinées essentiellement à la santé, la cosmétique et l'alimentation est d'environ 14 Mt/an ces dernières années et sachant que la filière est naissante, il est difficile de construire un scénario d'avenir fiable. Et ce d'autant que la production à des fins énergétiques est d'une valeur

ajoutée plus faible que celle des autres secteurs¹¹. Il a donc été choisi de ne pas considérer cette ressource dans la présente étude.

2.3.2. Fléchage et priorisation des usages des biomasses

Le tableau suivant identifie les différentes catégories de biomasses mobilisables pour répondre à la demande de chacune des filières biocarburants considérées dans les scénarios. Pour un procédé donné plusieurs types de ressources sont potentiellement mobilisables. Dans le modèle OPERA des règles de priorisation du recours aux différentes ressources biomasses sont alors définies en regard des pratiques actuellement observées en France (Tableau 5). Grâce aux jeux de rendements biomasse/procédé associés, le modèle permettra de déterminer les quantités de chacune des ressources mobilisées et d'analyser par la suite le niveau de pression potentiel des scénarios en regard des trajectoires de disponibilité totale des ressources décrites précédemment.

Filières	Biomasses	Règles de priorisation d'usage à 2050
Biocarburants liquides conventionnels issus d'huiles végétales (FAME, HVO)	Colza, tournesol	N/A
Biocarburants liquides « autres » issus d'huiles et graisses usagées (FAME, HVO)	UCO, graisses animales, huiles acides	N/A
Biocarburants liquides conventionnels issus de sucres (éthanol, ATJ)	Céréales, betterave sucrière	Conservation des proportions actuelles (2019) entre éthanol de céréales (77%) et de betterave (23%)
Biocarburants liquides lignocellulosiques (Ethanol, BtL, e-BtL, ATJ)	Bois, résidus agricoles, cultures pérennes, CSR	1) Bois, CSR et résidus agricoles 2) Cultures pérennes
Biocarburants liquides avancés issus d'huiles (FAME, HVO)	Microalgues	Pas de priorisation nécessaire
Biométhane issu de méthanisation	Déchets organiques, CIVE, cultures dédiées (maïs)	1) déchets organiques + 5% de culture dédiées ¹² 2) CIVE
Biométhane lignocellulosique (pyrogazéification, gazéification hydrothermale)	Bois, résidus agricoles, cultures pérennes, CSR	1) Bois, CSR et résidus agricoles 2) Cultures pérennes

¹¹ Le Rapport n° 21125 du Le Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER), « Présentation et développement de l'algoculture en France » [24] n'établit pas de potentiel de production et considère peu voire pas du tout les applications énergétiques des macroalgues.

¹² La loi autorise jusqu'à 15% de cultures céréalières dédiées en entrée de méthaniseurs, mais on considère ici une valeur de 5% seulement qui est l'utilisation tendancielle [21]

2.3.3. Usages en biocarburants liquides et gazeux

Dans un objectif de neutralité carbone du secteur transport routier, on suppose le remplacement à 100% en 2050 des carburants fossiles par des carburants alternatifs durables (biocarburants et e-fuels) pour les derniers véhicules à motorisations thermiques restants (avec des objectifs intermédiaires de 15% en 2030 pour les pools essence et gazole, 10% pour le GNV, puis 40% en 2040 pour l'ensemble des pools). Les taux d'incorporation spécifiques pour les e-fuels sont basés sur les valeurs du Tableau 1 et de la Figure 11. Les trajectoires d'évolution respectives de biocarburants et e-fuels sont présentées Figure 15.

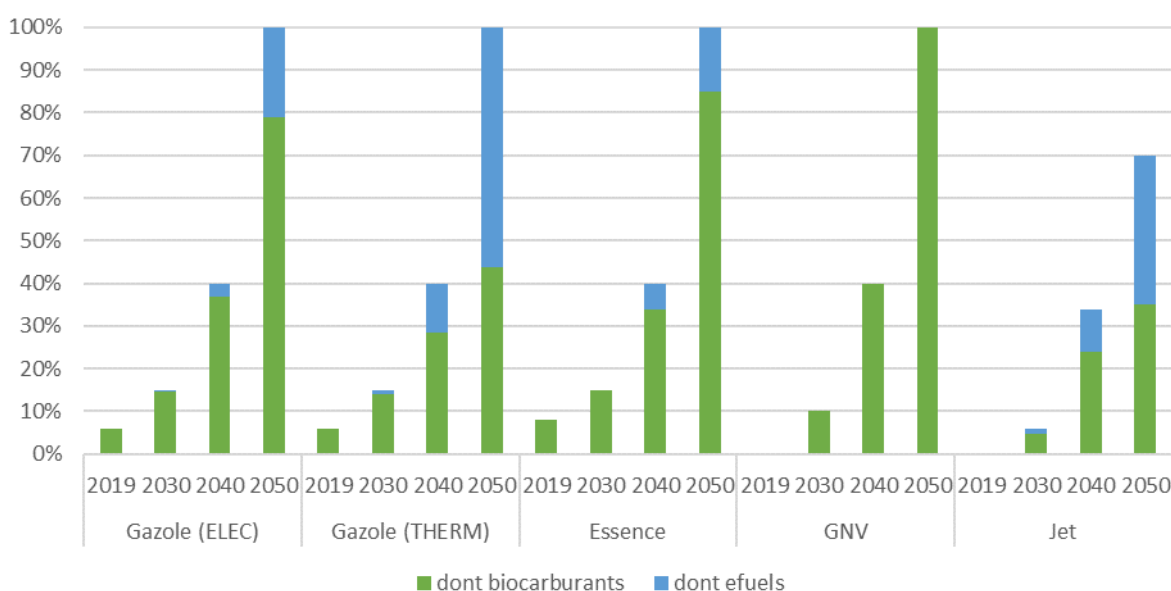


Figure 15. Trajectoires d'évolution des taux d'incorporation (PCI) des substituts aux carburants des véhicules thermiques

Cela signifie pour le transport routier la substitution du gazole par différents types de biodiesels et gazole de synthèse e-fuel, de l'essence par différents types de bioessence et d'essence de synthèse efuel, et du GNV par du biométhane.

Le secteur du transport aérien (vols intérieurs et internationaux au départ de la France) suit les objectifs de substitution du RefueLEU aviation définis par la Commission Européenne à savoir un taux de substitution de 6% en 2030, 34% en 2040 et 70% en 2050 (voir Tableau 1).

▪ Substituts biocarburants au gazole routier

Pour le biodiesel, les voies de fabrication et les ressources associées sont détaillées dans le Tableau 6.

Type de Substitut	Catégories de Biocarburants REDII	Nom et acronyme du procédés biocarburants	Inputs biomasses
Gazole	Biodiesels Conventionnels	Ester Méthylique d'Acide Gras EMAG	Huiles végétales (colza, tournesol...)
		Biogazole d'huiles végétales hydrogénées HVO	Huiles végétales locales (colza, tournesol...)
	Biodiesels Autres	Ester Méthylique d'Acide Gras EMAG	Huiles végétales usagées (UCO)
			Graisses animales
		Biogazole d'huiles végétales hydrogénées HVO	Huiles végétales usagées (UCO)
			Graisses animales
	Biodiesel Avancés	Ester Méthylique d'Acide Gras EMAG	Huiles issues de microorganismes autotrophes (microalgues)
		Biogazole d'huiles végétales hydrogénées HVO	Huiles issues de microorganismes autotrophes (microalgues)
		Biogazole Fischer-Tropsch BTL	Coproduits de récolte agricoles
			Cultures lignocellulosiques pérennes
			Bois
			Autres déchets ligneux industriels
		Biogazole Fischer-Tropsch avec H ₂ eBTL	Coproduits de récolte agricole
			Cultures lignocellulosiques pérennes
			Bois
			Autres déchets lignocellulosiques industriels

Tableau 6. Substituts biodiesels et leurs procédés

On distingue ainsi 4 technologies de production de biodiesels réparties dans les trois catégories biocarburants définis par la REDII (conventionnels, avancés et autres).

D'ici à 2050, les évolutions des contributions des différentes technologies pour la production de biodiesel ont été estimées telles que représentées sur la Figure 16.

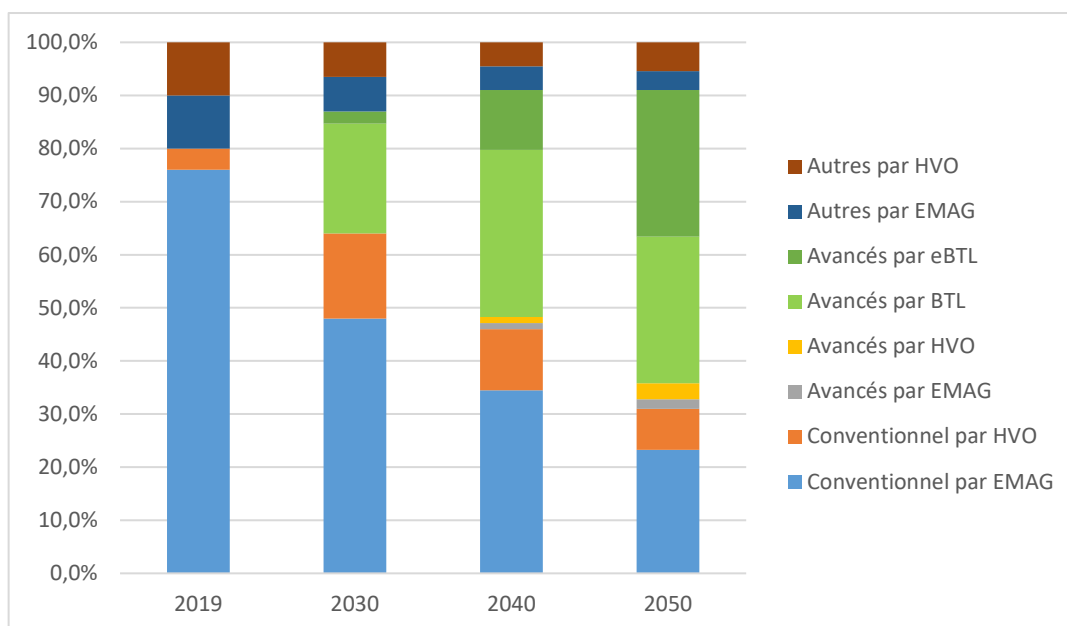


Figure 16. Répartition technologique biodiesels (%)

En 2019 le biodiesel mis à la consommation en France comprend une grande majorité d'EMAG « conventionnel » (issus d'huiles végétales) et EMAG « autres » (issus d'huiles et graisses usagées), ainsi que d'HVHTG (Huiles Végétales Hydrogénées de type Gazole) ou Gazole d'HVO issu des mêmes ressources. A partir de 2030 on voit apparaître les filières biodiesels avancées comme le BtL et le e-BtL en réponse aux objectifs REDII, tandis que la filière HVO continue de se développer. En 2040 et 2050 la tendance se poursuit avec une part de filières avancées en progression à l'instar des filières conventionnelles et avec une stabilisation des filières EMAG et HVO « autres » pour lesquels la disponibilité des ressources atteint ses limites. On voit également apparaître une filière HVO avancée issue de la culture de microalgues lipidiques.

▪ Substituts biocarburants à l'essence du transport routier

Pour la bioessence, les voies de fabrication et les ressources associées sont détaillées dans le Tableau 7.

Type de Substitut	Catégories de Biocarburants	Nom et acronyme du procédés biocarburants	Inputs biomasses
Essence	Bioessences conventionnel	Ethanol de céréales	Céréales
		Ethanol de betterave	Betterave à sucre
		Essence de synthèse issues de Bionaphta d' HVO	Huiles végétales (colza, tournesol...)
	Bioessences autres	Essence de synthèse issues de Bionaphta d' HVO	Huiles végétales usagées (UCO)
			Graisses animales
	Bioessences avancées	Ethanol lignocellulosique	Coproduits de récolte agricoles
			Cultures lignocellulosiques pérennes
			Bois
			Autres déchets lignocellulosiques industriels
		Essence Fischer-Tropsch issues de Bionaphta de BTL	Coproduits de récolte agricoles
			Cultures lignocellulosiques pérennes
			Bois
			Autres déchets lignocellulosiques industriels
		Essence Fischer-Tropsch issues de Bionaphta de eBTL	Coproduits de récolte agricoles
			Cultures lignocellulosiques pérennes
			Bois
			Autres déchets lignocellulosiques industriels
		Essence de synthèse issues de Bionaphta d' HVO	Huiles issues de microorganismes autotrophes (microalgues)

Tableau 7. Substituts bioessence et leurs procédés

Parmi les biocarburants pour motorisation essence on compte l'éthanol ainsi que les essences issues des naphta d'HVO et de (e-)BTL. D'ici à 2050, les évolutions des contributions des différentes technologies pour la production de bioessence sont susceptibles de varier en fonction de l'évolution du parc de VP essence. Dans un scénario avec interdiction des ventes de VP thermiques à 2035 (scénario ELEC), les taux de pénétration des différentes technologies bioessence ont été estimées suivant la répartition Figure 17.

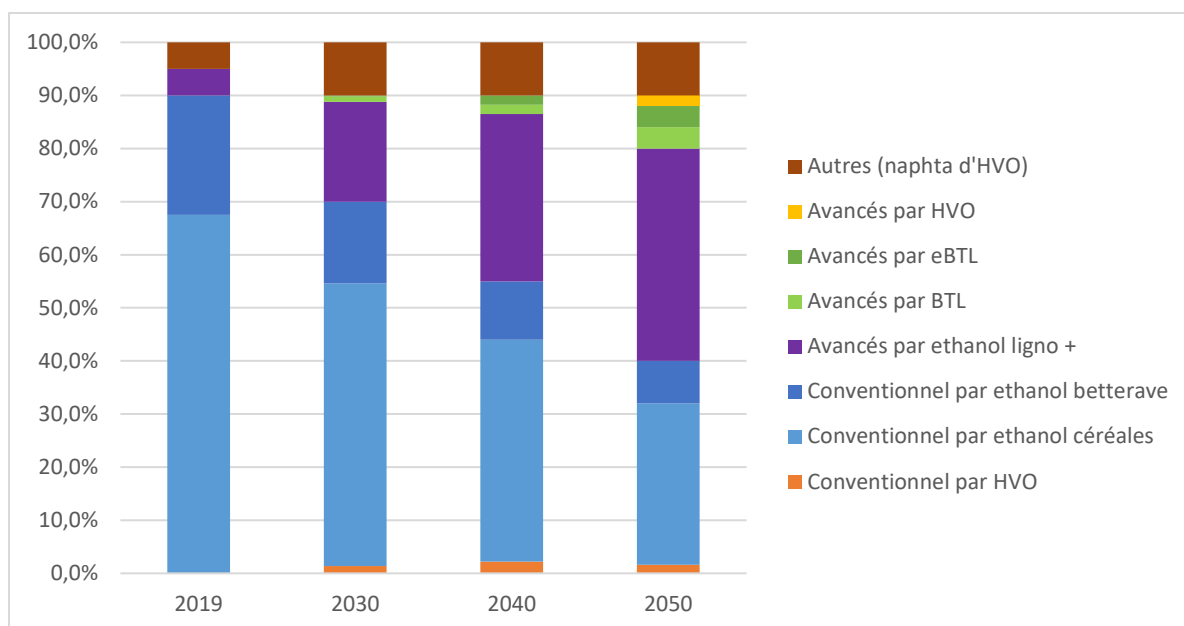


Figure 17. Répartition technologique bioessence (%) – Scénario ELEC

En 2019 les bio-essences mis à la consommation en France sont essentiellement composées d'éthanol conventionnel issu de céréales ou de betterave. Une part très minoritaire d'HVHTE (Huiles Végétales Hydrogénées de type Essence) ou essence d'HVO commence à être incorporée. On compte également une petite part d'éthanol avancé correspondant à l'éthanol produit à partir de résidus de la filière viticole (alcool vinique ou égouts pauvres), compris dans la catégorie *éthanol ligno +* dans la figure précédente. Cette filière reste cependant limitée par une disponibilité en ressources intégralement mobilisée et a priori peu évolutive. En 2030 l'éthanol avancé issu de biomasse lignocellulosique fait son apparition dans le mix en réponse aux objectifs REDII. Avec le développement des biodiesels et bio kérosènes de type BtL et HVO, la coproduction des naphtas bénéficie ici au pool essence.

Dans le cas où le parc de véhicules thermiques essence resterait significatif en 2050, une autre répartition des technologies est envisagée (scénarios THERM et HYB), avec des investissements plus importants dans l'éthanol lignocellulosique en remplacement des filières conventionnelles, présentée Figure 18.

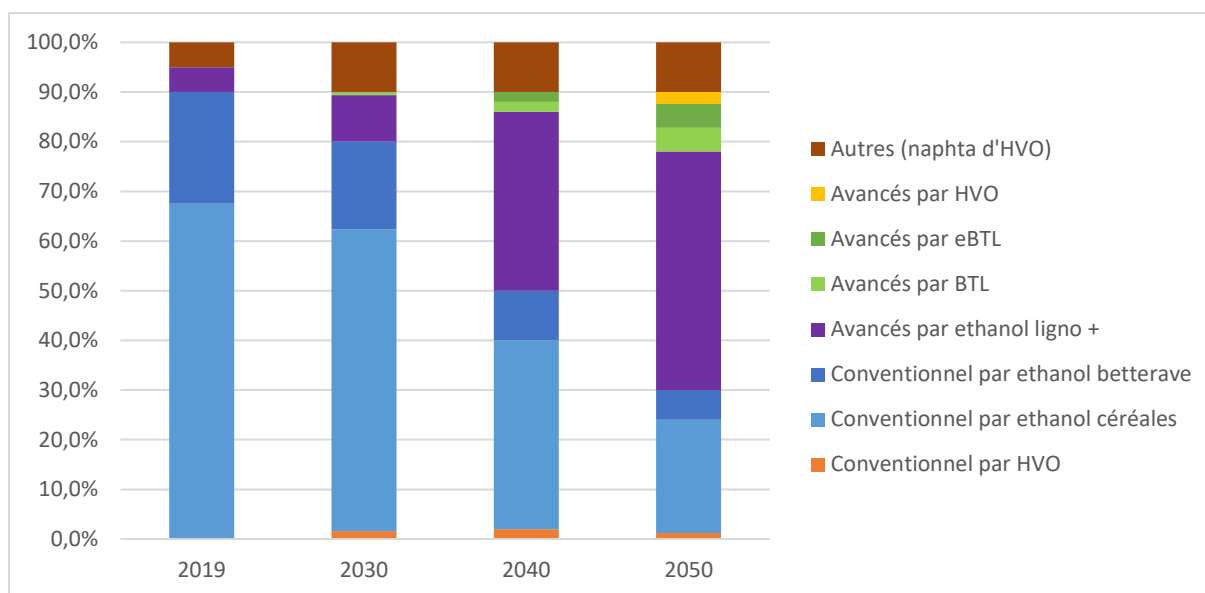


Figure 18. Répartition technologique bioessence (%) - Scénarios THERM et HYB

▪ Substituts biométhane au GNV du transport routier

Un certain nombre de véhicules routiers utilise des formes dérivées de gaz naturel en tant que combustible, que ce soit pour le transport de passager ou de marchandises. Ce GNV sera progressivement remplacé par des alternatives renouvelables, à savoir le biométhane (voir Figure 15).

Deux voies de production de biométhane sont envisagées, d'une part la méthanisation de déchets organiques ou de cultures dédiées (dont les CIVE¹³), d'autre part la pyrogazéification de biomasse lignocellulosique, procédé moins industriellement mature actuellement. Le taux de pénétration de cette technologie à 2050 est issu du scénario ADEME S3 [4] (voir Tableau 8).

	2015	2030	2050
Pyrogazéification	0%	1%	29%
Méthanisation	100%	99%	71%

Tableau 8. Voies de production du biométhane (ADEME S3)

▪ Substituts biocarburants au kérosène du transport aérien

Enfin pour la demande de carburants pour l'aviation, en plus de la consommation pour la mobilité nationale (1,3 Mtep en 2019), il existe une demande significative de kérosène liée aux ravitaillements des vols internationaux dans les aéroports français. Ces soutes internationales de carburants s'élèvent à environ 5,7 Mtep sur la période 2015-2019.

Des objectifs européens vont imposer un remplacement progressif de ce kérosène par des alternatives renouvelables, notamment avec la loi ReFuelEU. Les substitutions biocarburants possibles sont détaillées dans le Tableau 9.

¹³ CIVE : Cultures Intermédiaies à Vocation Energétique

Type de Substitut	Catégories de Biocarburants	Nom et acronyme du procédés biocarburants	Inputs biomasses
Jet	Biojets Conventionnels	Biojet d'huiles végétales hydrogénées HVO	Huiles végétales (colza, tournesol...)
		Biojet issu d'alcool type éthanol ou butanol Alcohol-to-jet ATJ	Céréales, betterave
	Biojets Autres	Biojet d'huiles végétales hydrogénées HVO	Huiles végétales usagées (UCO) Graisses animales
	Biojets Avancés	Biojet Fischer-Tropsch BtL	Coproduits de récolte agricoles
			Cultures lignocellulosiques pérennes
			Bois
			Autres déchets lignocellulosiques industriels
		Biojet Fischer-Tropsch avec H ₂ eBtL	Coproduits de récolte agricoles
			Cultures lignocellulosiques pérennes
			Bois
			Autres déchets lignocellulosiques industriels
		Biojet issu d'alcool type éthanol ou butanol Alcohol-to-jet ATJ	Coproduits de récolte agricoles
			Cultures lignocellulosiques pérennes
			Bois
			Autres déchets lignocellulosiques industriels
		Biojet d'huiles végétales hydrogénées HVO	Huiles issues de microorganismes autotrophes (microalgues)

Tableau 9. Substituts biojet et leurs procédés

On considère ainsi 4 technologies de production de bio kérosènes, dont les HVO, BtL et e-BTL également considérés pour la production de biodiesels et bio-essences, ainsi que l'alcohol-to-jet (ATJ), pouvant être produit à partir des filières éthanol existantes et futures.

D'ici à 2050, les évolutions des contributions des différentes technologies pour la production de biojet ont été estimées selon la répartition Figure 19.

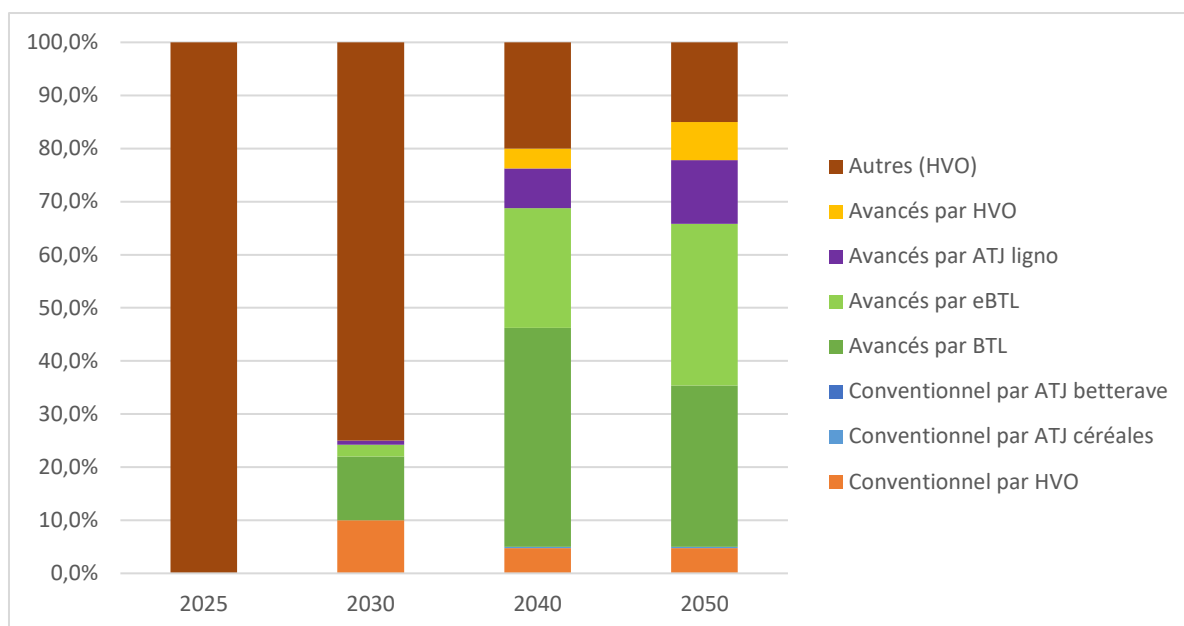


Figure 19. Répartition technologique biojet (%)

L'incorporation de bio kérosène (ou biojet) dans le transport aérien est initiée entre 2024 et 2030 avec en premier lieu le biojet d'HVO principalement issu d'huiles et graisses usagées, ainsi qu'une part minoritaire de biojet FT issues des technologies BtL et e-BtL. Ces dernières se développent prioritairement aux horizons 2040 et 2050, tandis qu'une part d'AtJ avancé issu d'éthanol lignocellulosique et d'HVO avancé issu de microalgues lipidiques vient compléter le mix de filières en fin d'horizon pour assurer la croissance de la demande. L'usage d'ATJ issu d'éthanol conventionnel (céréale ou betterave) permet de valoriser l'éthanol dont l'usage est en baisse dans le transport routier.

2.4. Autres secteurs

Un certain nombre de secteurs non mentionnés précédemment sont impactants pour notre étude mais ne rentrent pas dans le périmètre direct de la modélisation. On s'intéresse dans cette partie aux hypothèses ayant trait au mix électrique ainsi qu'aux demandes en biomasse hors du secteur du transport.

2.4.1. Mix électrique

Concernant le mix électrique, on considère que, de manière similaire à tous les scénarios prospectifs RTE [25], l'électricité est entièrement décarbonée en 2050. Les choix technologiques (renouvelables ou nucléaire), ainsi que la faisabilité technique et économique de l'évolution du parc de production électrique français sont considérés comme hors du scope de cette étude, car dépendants de scénarios de demande sur des secteurs non modélisés.

2.4.2. Biomasse énergie hors transport

Concernant la biomasse, celle-ci possède des usages dans des secteurs autres que le transport, à savoir l'utilisation sous forme de bois énergie pour les secteurs résidentiel, tertiaire, industriel et des réseaux de chaleur ; et la production de biométhane en remplacement du gaz naturel pour des usages dans l'agriculture, l'industrie, le bâtiment ou encore la production d'électricité. Bien que non liées à notre modélisation du secteur transport, ces demandes ont un impact sur les ressources en biomasse disponibles et doivent donc être incluses dans l'étude.

Les demandes utilisées dans notre modélisation pour ces usages sont issues du scénario S3 de l'exercice prospectif « Transitions 2050 » de l'ADEME publié en 2022 [4], scénario dont le narratif global se rapproche le plus de la dynamique de nos scénarios technologiques pour le transport, à savoir un recours aux nouvelles technologies non émettrices de CO₂ plutôt qu'une baisse importante de la demande.

	2030	2050
Bois énergie pour le résidentiel, tertiaire, industrie et réseaux de chaleur	111,4 TWh	105,8 TWh
Biométhane hors transport	42,5 TWh	134 TWh

Tableau 10. Demandes en biomasse énergie hors transport (ADEME S3)

3. Résultats

Cette section présente les résultats obtenus avec le modèle OPERA en termes d'émissions de CO₂, de consommation d'énergie finale et de ressources pour le secteur transport dans les trois scénarios présentés précédemment.

3.1. Emissions GES

On s'intéresse aux émissions du secteur transport dans les différents scénarios. On considère les émissions à l'échappement des véhicules et aéronefs évoluant sur le territoire national, celles liées à la production d'électricité et hydrogène produits en France.

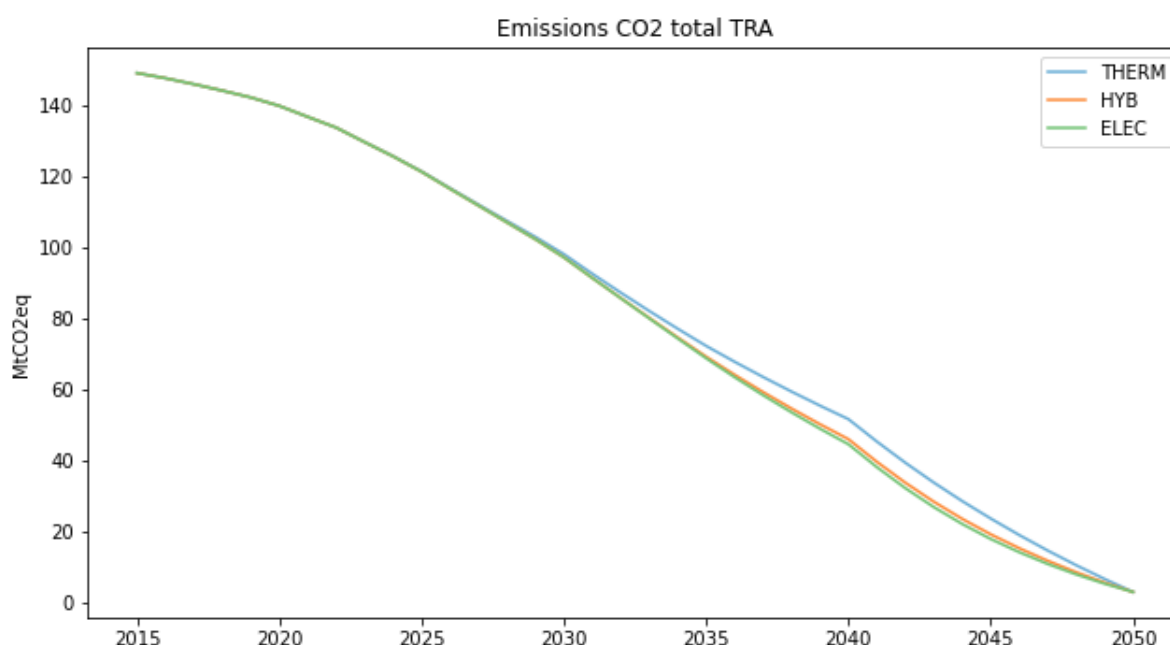


Figure 20. Emissions de CO₂ du secteur transport

Toutes les trajectoires aboutissent à des émissions de 2,8 MtCO₂eq en 2050. Cette part résiduelle correspond notamment à la part non substituée de kérosène dans le transport aérien national.

On ne note logiquement pas de différences majeures dans les émissions finales du secteur en 2050. En effet dans tous les scénarios, on fait l'hypothèse d'une substitution à 100% en 2050 des carburants fossiles restants. Cependant les voies pour aboutir à cette substitution complète sont différentes entre les scénarios et auront des impacts distincts sur les différentes ressources et vecteurs, détaillés dans les sections suivantes.

3.2. Carburants liquides et substituts

La Figure 21 présente l'évolution de la consommation des différents combustibles liquides pour chacun des trois scénarios.

Bien qu'en forte décroissance entre 2020 et 2050 la demande de carburants pour motorisation diesel reste significative en fin d'horizon (supérieure à 4,5 Mtep) dans tous les scénarios. Cela est dû à la part restante pour le transport routier de marchandises assurée par des poids lourd Diesel. Cependant la fin des ventes de voitures particulières thermiques permet de diminuer de moitié cette demande entre le scénario THERM et ELEC.

Concernant la demande en essence, elle décroît à partir de 2035 pour un atteindre un minimum de 1,7 Mtep en 2050 pour les scénarios ELEC au vu de la disparition d'une part importante des véhicules particuliers à essence après 2040. Une demande plus importante pour ce carburant subsiste pour les scénarios HYB et THERM pour lesquels l'électrification du parc de VP est moins rapide et laisse une place à l'hybridation essence et aux motorisations essence respectivement.

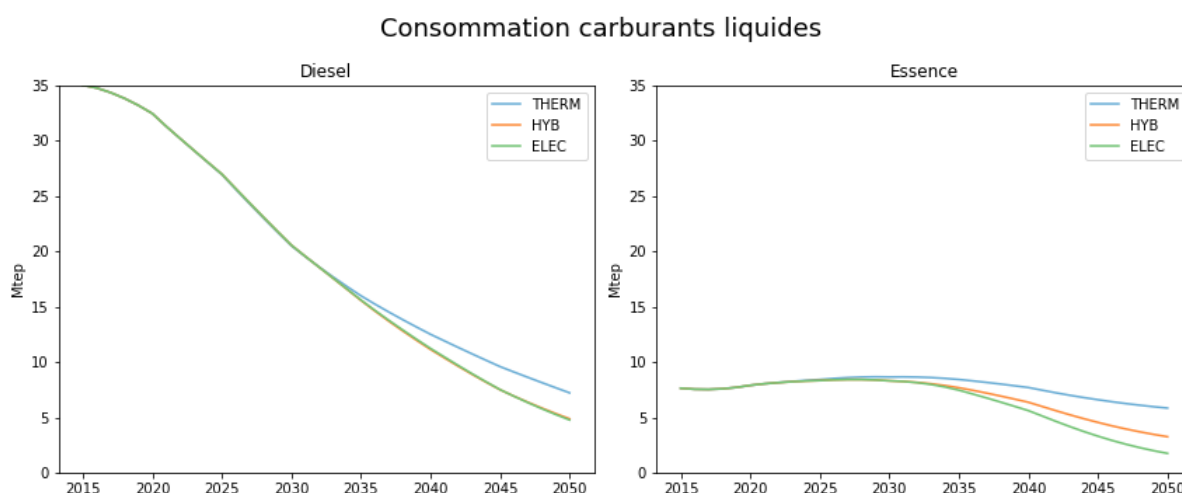


Figure 21. Consommations de diesel et d'essence dans les 3 scénarios

Au total c'est entre 4,7 et 7 Mtep de diesel et 1,8 et 6 Mtep d'essence qu'il faut substituer en 2050 pour atteindre un objectif 100% renouvelable. A cela s'ajoutent les objectifs d'incorporation de SAF pour les carburéacteurs mis à la consommation sur le territoire national (vols nationaux et internationaux). Avec les taux d'incorporation définis dans les sections 2.2 et 2.3.3, on a donc les évolutions des demandes en biocarburants et e-fuels présentées dans les graphes suivants :

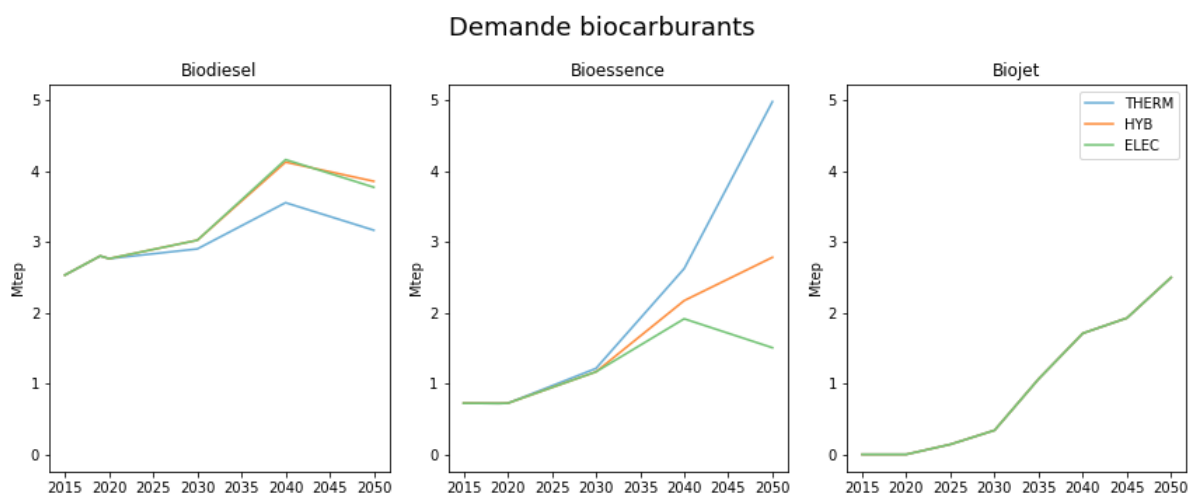


Figure 22. Evolution des consommations de biocarburants liquides pour les pools gazole, essence et kérosène

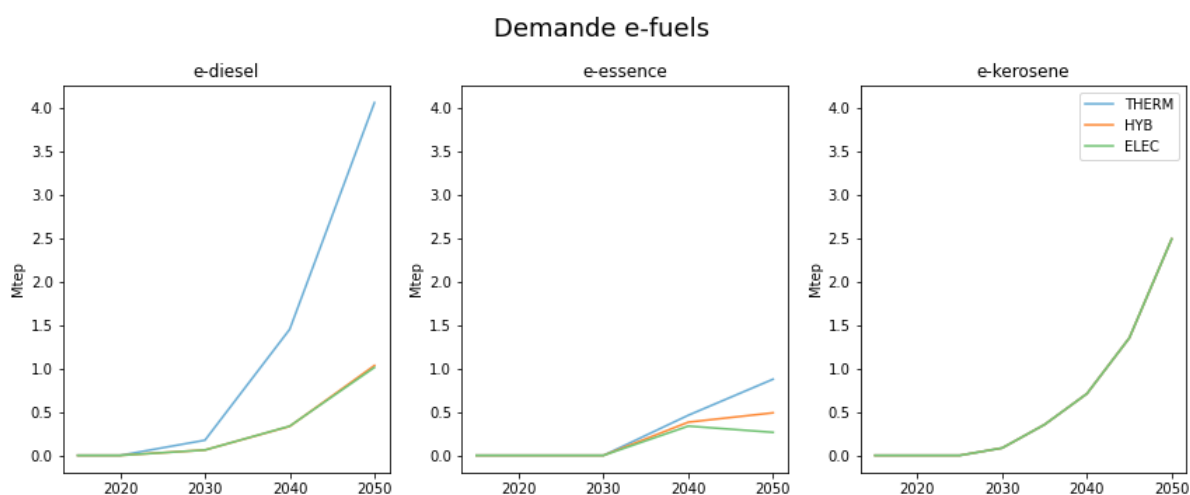


Figure 23. Evolution des consommation d'e-fuels liquides pour les pools gazole, essence et kérosène

Pour le **scénario ELEC** les substituts liquides les plus importants sont les biodiesels du fait d'une disponibilité faible en d'autres carburants alternatifs pour les motorisations diesel. Ils sont ensuite suivis des SAF pour le secteur aérien (biokérosène et e-kérosène), tandis que les bio-essence, e-diesel et e-essence) ont des marchés inférieurs à 2 Mtep sur l'ensemble de l'horizon temporel.

Pour le **scénario THERM** c'est le marché des bio-essence et en particulier de l'éthanol qui apparaît le plus important à partir de 2040 du fait d'une électrification moindre du parc de véhicules particuliers. Les e-diesels suivis des biodiesels sont également mobilisés à plus de 3 Mtep.

Quant au **scénario HYB**, les substituts aux pools gazole et kérosène ont des trajectoires similaires à ELEC tandis que les demandes en substituts essence ont des niveaux intermédiaires entre ELEC et THERM.

Ainsi pour le pool essence, au vu de la demande encore importante dans le scénario THERM, on constate des demandes en bioessence et e-essence 3,3 fois plus grandes que dans le scénario ELEC (et 1,8 fois par rapport au scénario HYB)

Pour le pool diesel, la demande en biocarburants est 1,2 fois plus importante pour le scénario ELEC que pour THERM. Cependant la tendance est inversée pour les e-fuels où la demande pour le scénario ELEC est 4 fois inférieure à celle du scénario THERM. La demande totale en diesel étant la plus faible pour ELEC, ces disparités proviennent de la forte différence entre les 2 stratégies d'incorporation de e-diesel (20% pour ELEC contre 56% pour THERM), le recours est donc plus important aux biocarburants dans le premier cas (rappel des hypothèses en Figure 15).

Les trajectoires d'incorporation et de demande pour la partie kérosène sont ici les mêmes pour les trois scénarios soit une demande de SAF atteignant 5 Mtep en 2050 dont 2,5 Mtep de biokérosène et 2,5 Mtep d'e-kérosène.

Les différentes filières biocarburants peuvent être distinguées par leur appartenance aux catégories définies par la directive européenne REDII : biocarburants « conventionnels » (issus de grandes cultures également valorisées en alimentation humaine ou animale) ; biocarburants « avancés » (issus de biomasse lignocellulosiques et autres déchets et sous-produits listés à l'annexe IX-A de la directive) ; biocarburants « autres » (issus d'huiles de cuisson usagées et graisses animales listées à l'annexe IX-B de la Directive).

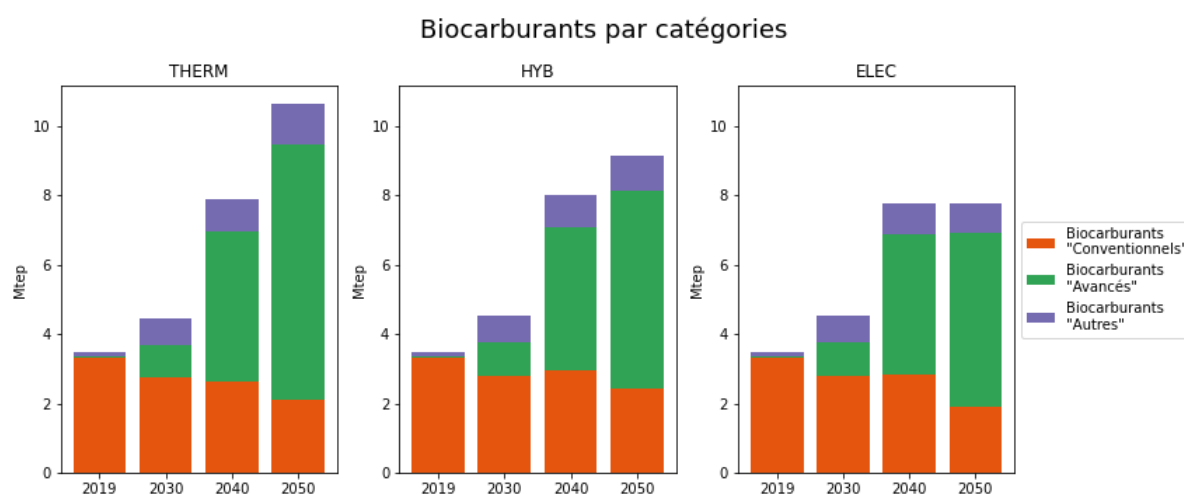


Figure 24. Evolution des consommations de biocarburants liquides par catégories REDII

Cette figure illustre le niveau global de biocarburants consommé dans les 3 scénarios, avec un niveau maximum de 10,5 Mtep pour le scénario THERM en 2050, de 9 Mtep pour le scénario HYB et de 7,7 Mtep pour le scénario ELEC à partir de 2040. Si la répartition des biocarburants parmi les 3 catégories REDII est similaire jusqu'en 2040, c'est en 2050 que les scénarios se distinguent, avec des niveaux de consommations plus importants pour les trois catégories dans le scénario THERM et en particulier pour les biocarburants avancés (7,3 Mtep dans THERM contre 5 Mtep dans ELEC).

3.3. Consommation d'hydrogène et d'électricité

La demande en hydrogène pour le transport, présentée Figure 25, découle de deux contributions principales : l'utilisation directe dans des véhicules à pile à combustible (principalement dans le fret pour nos scénarios) et l'utilisation pour la production d'e-fuels.

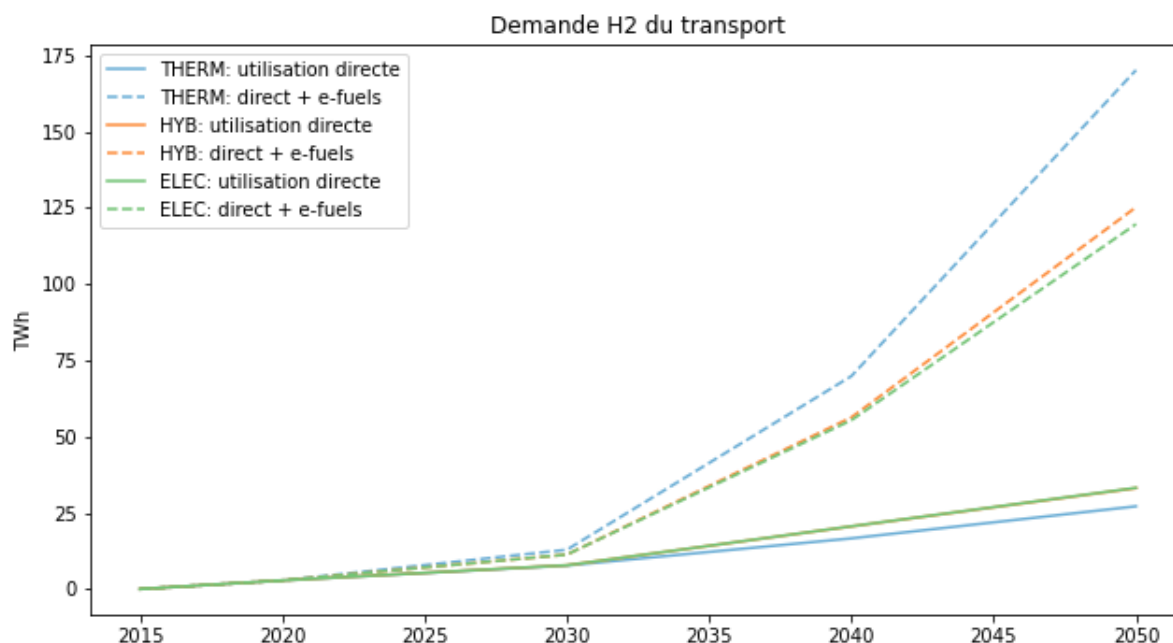


Figure 25. Demande en hydrogène pour les 3 scénarios, avec et sans la production d'e-fuels (en TWh)

Cette demande d'hydrogène croît très fortement jusqu'en 2050 pour atteindre 33 TWh_{H₂} (soit environ 1 Mt) en utilisation directe dans le scénario ELEC. Les scénarios THERM et HYB ont un besoin d'hydrogène direct inférieur, égal à environ 27 TWh_{H₂} (soit 800 000t environ). Cela est lié à l'introduction plus poussée de véhicules à pile à combustible dans le routier marchandises mais aussi dans le ferroviaire et le fluvial.

Cependant lorsqu'on inclut le besoin d'hydrogène pour les e-fuels, ceux-ci s'élèvent à 86 TWh_{H₂} (2.6 Mt) pour le scénario ELEC et 142 TWh_{H₂} (4,3 Mt) pour le scénario THERM, soit une demande totale entre 3,6 et 6 fois plus élevée (120 TWh_{H₂} ou 3,6 Mt pour ELEC et 170 TWh_{H₂} ou 5,1 Mt pour THERM).

Cette demande est bien plus importante que celle anticipée dans les Futurs Energétiques 2050 de RTE [25] et le scénario le plus poussé vers l'hydrogène, le scénario « Hydrogène + ». Ce scénario considère une demande en hydrogène de 29 TWh_{H₂} pour la mobilité hors e-fuels, soit le même ordre de grandeur que nos scénarios, et 44 TWh_{H₂} pour les e-fuels au global pour les transports. Les demandes en e-fuels dans nos scénarios ELEC et THERM sont donc respectivement 2 et 3,2 fois supérieure à celle projetée dans le scénario « Hydrogène + ». On peut alors s'attendre à une demande électrique particulièrement importante pour ce secteur.

Comme l'illustre la Figure 26, la consommation électrique finale du secteur transport est principalement liée d'une part à l'utilisation des véhicules électriques à batterie, et d'autre part à la production d'hydrogène par électrolyse pour répondre à la demande présentée précédemment.

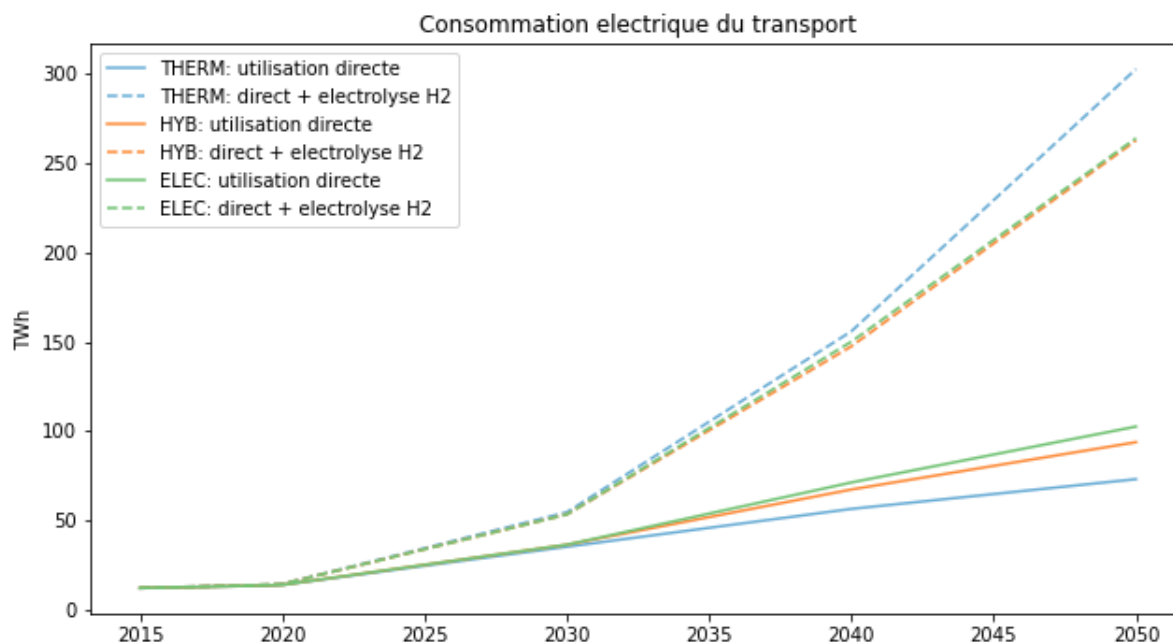


Figure 26. Consommation d'électricité pour les 3 scénarios, avec et sans les besoins pour la production d'H₂ (en TWh)

Si la demande électrique directe la plus forte en 2050 est de 103 TWhélec pour le scénario ELEC, c'est finalement un des scénarios avec la consommation électrique totale la plus basse (264 TWhélec). En effet comme mentionné précédemment, la production d'hydrogène pour les e-fuels représente un poste majeur de consommation en 2050, et sera satisfaite uniquement par des électrolyseurs, ce qui a pour effet de plus que doubler la demande en électricité du secteur par rapport à la demande pour les véhicules à batterie (117 TWhélec dédiés à la production d'e-fuels pour le transport et 45 TWhélec pour l'hydrogène direct).

Cette différence est encore plus marquée dans le cas du scénario THERM où la demande totale atteint 302 TWhélec (192 TWhélec seulement pour les e-fuels et 37 TWhélec pour l'hydrogène direct) soit 14% de plus que le scénario ELEC, pour seulement 73 TWhélec nécessaire aux véhicules à batteries.

Enfin le scénario HYB possède une demande électrique de 262 TWhélec, soit légèrement plus faible que le scénario ELEC.

Dans les scénarios de demande RTE, la demande d'électricité pour le secteur du transport de référence est de 98,7 TWhélec (et entre 76,6 et 125,2 TWhélec pour les variantes), ce qui est cohérent avec nos trajectoires proposées.

Cependant, même dans le scénario de demande où l'hydrogène est le plus développé, la consommation électrique pour la production d'e-fuels est de seulement 67 TWhélec, alors que le scénario ELEC projette une demande 1,7 fois supérieure et 2,9 fois pour le scénario THERM. Ce résultat

est induit par l'hypothèse que l'ensemble des e-fuels mis à la consommation en France est issu d'une production d'H₂ par électrolyse. Nos scénarios, étant centrés sur le secteur du transport uniquement, ne tiennent pas compte des limites sur l'offre totale d'approvisionnement en électricité (comme expliqué section 2.4.1), contrairement aux scénarios RTE qui intègrent des limites sur l'offre.

Au vu de ces résultats, le bouclage électrique apparaît donc comme un enjeu particulièrement important face à la demande croissante en e-fuels. Cela tombe dans les limites de l'étude, qui pourraient être levées par d'autres travaux intégrant des rétroactions sur le système, dans les cas où la demande paraît excessive. Pour répondre à cette problématique, les contraintes et leviers à étudier peuvent soit porter directement sur le secteur transport soit sur d'autres secteurs, en jouant sur les leviers de la demande et des priorités d'usages.

3.4. Demande en biométhane

La demande en biométhane est dans ces scénarios adressée par le transport routier de passager (véhicules GNV) et le transport routier de marchandises (GNC et GNL) (voir sections 2.1.1 et 2.1.2). Le taux d'incorporation de biométhane dans le gaz naturel carburant a été défini à hauteur de 10% en 2030, 40% en 2040 et 100% en 2050 pour les trois scénarios. Les hypothèses de pénétration des différentes technologies de production de biométhane sont détaillées en section 2.3.3.

Par ailleurs, le biométhane est également consommé dans les secteurs du résidentiel, de l'industrie et de l'agriculture. Comme décrit en section 2.4.2, ce sont les demandes en biométhane hors transport du scénario S3 de l'ADEME qui sont reprises ici à titre comparatif.

Sur la base de ces jeux d'hypothèses, les trajectoires de demandes totales et hors transport en biométhane des différents scénarios sont illustrées ci-après :

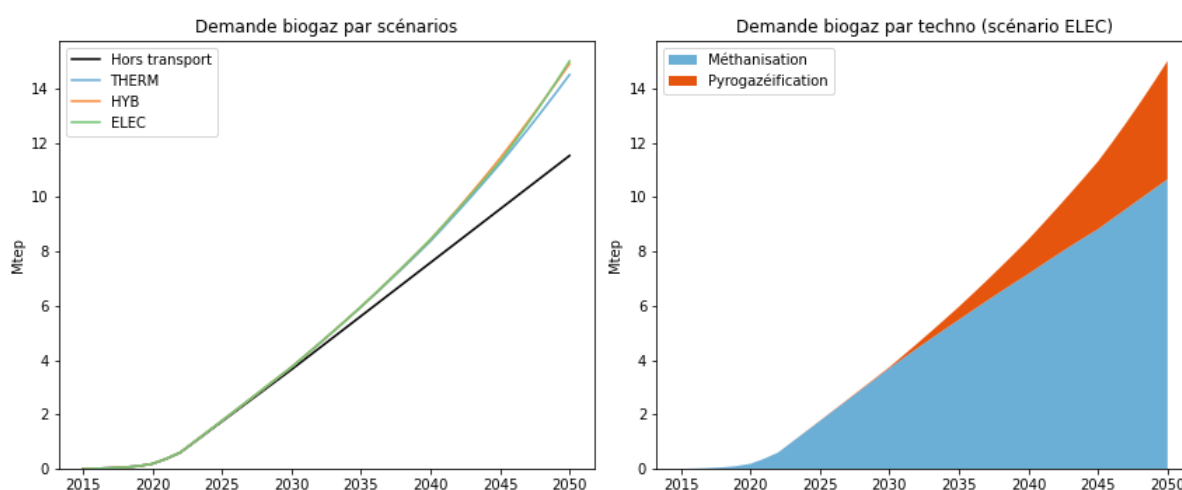


Figure 27. Trajectoires de demandes en biométhane par scénario (en Mtep) pour l'ensemble des secteurs et pour les secteurs hors transport (à gauche) et par technologie (à droite)

On constate que la demande pour le secteur transport commence à croître principalement à partir de 2030 pour atteindre entre 3 et 3.5 Mtep en 2050 selon les scénarios. L'écart entre les trois scénarios

est assez faible car les taux d'incorporation de biométhane en remplacement du GNV est le même. Lorsque que l'on rajoute la demande en biométhane hors transport telle qu'envisagée dans le scénario S3 de l'ADEME (voir section 2.4.2), on atteint une demande totale de 14.5 à 15 Mtep, avec le secteur transport qui représente donc environ 20% de la demande totale.

Le mix technologique de production de biométhane est majoritairement composé de biogaz de méthanisation (jusque 10,7 Mtep en 2050). Puis à partir de 2030 on observe l'émergence de la filière pyrogazéification avec un développement atteignant environ 4,4 Mtep en 2050.

A noter que les trois scénarios de cette étude considèrent une substitution totale de la demande en gaz naturel du transport par du biométhane, une hypothèse pouvant paraître ambitieuse car ce n'est pas systématiquement le cas dans les autres scénarios de type neutralité carbone qui ont recours à des solutions d'émissions négatives (ou puits de carbone) pour compenser une part de gaz naturel fossile non substitué.

3.5. Besoins en ressources biomasse

Les 3 scénarios étudiés induisent une utilisation de biocarburants et donc de ressources en biomasses plus ou moins importante calculée par le modèle OPERA. Afin d'avoir une analyse fine des différentes catégories de biomasses nécessaires, les différentes technologies de biocarburants déployées dans chacun des pools de carburants sont détaillées. Les Figure 28, Figure 29 et Figure 30 présentent la répartition des technologies pour la production de biocarburants obtenue sur la base des hypothèses de taux de pénétration décrites en section 2.3.3 pour les 3 scénarios :

A noter que dans les figures suivantes la demande de biométhane correspond a celle de l'ensemble des secteurs (transport, industrie, résidentiel, agriculture), soit autour de 14,5 Mtep, contre environ 3,5 Mtep pour le seul secteur transport

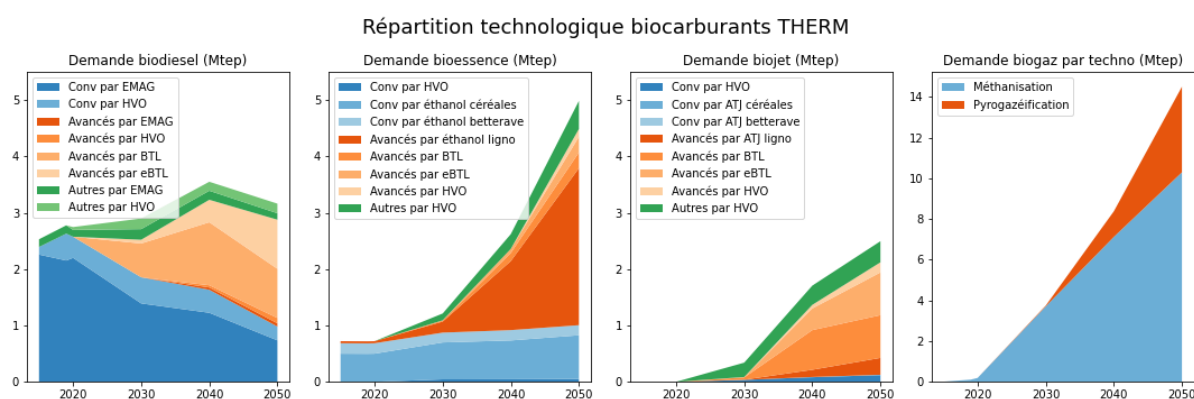


Figure 28. Trajectoires de déploiement des filières biocarburants pour chacun des 4 pools de carburants gazole, essence, kérosène et GNV (en Mtep) pour le scénario THERM

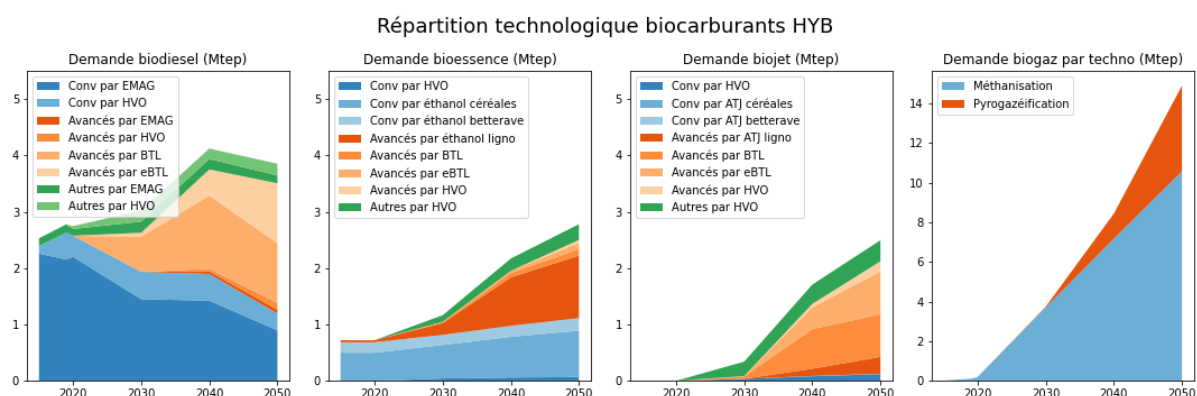


Figure 29. Trajectoires de déploiement des filières biocarburants pour chacun des 4 pools de carburants gazole, essence, kérosène et GNV (en Mtep) pour le scénario HYB

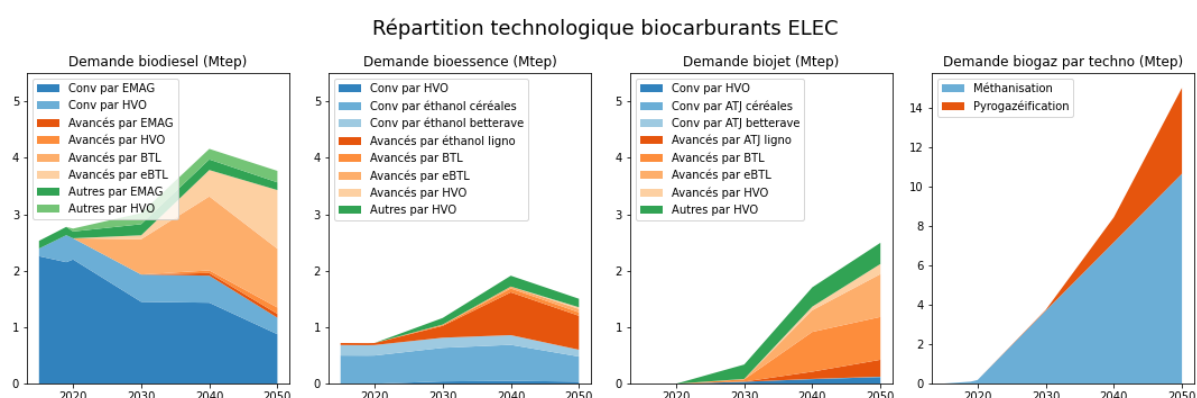


Figure 30. Trajectoires de déploiement des filières biocarburants pour chacun des 4 pools de carburants gazole, essence, kérosène et GNV (en Mtep) pour le scénario ELEC

A partir de ces résultats il est ainsi possible de définir les quantités de biomasses nécessaires à la réalisation de ces scénarios et de les analyser en regard des trajectoires de disponibilités minimum et maximum définies au chapitre 2.3. Dans cet exercice il est ainsi fait l'hypothèse que l'ensemble des biocarburants mis à la consommation sont produits sur le territoire national. Cette analyse vise ainsi à identifier la part de ressources biomasses qu'un jeu d'objectifs ambitieux de décarbonation quasi totale du secteur transport (et totale du transport routier) nécessiterait en regard de l'ensemble des ressources biomasses considérées comme disponibles pour l'énergie au niveau national. Elle vise notamment à flécher d'éventuelles tensions sur certaines catégories de ressources ou dans certains cas d'éventuels recours à l'importation.

On procède dans cette section à une comparaison entre le scénario le plus et le moins exigeant en termes d'appel à la biomasse. Cela correspond respectivement au scénario THERM, où un grand nombre de véhicules avec moteurs thermiques subsiste en 2050, ce qui implique une plus forte demande en substituts biosourcés ; et au scénario ELEC, où cette demande en carburants liquides est fortement diminuée grâce à une pénétration forte des véhicules électriques et hydrogènes. Sur la Figure 31, les demandes en biomasses sont comparées au scénario THERM sur une base 100.

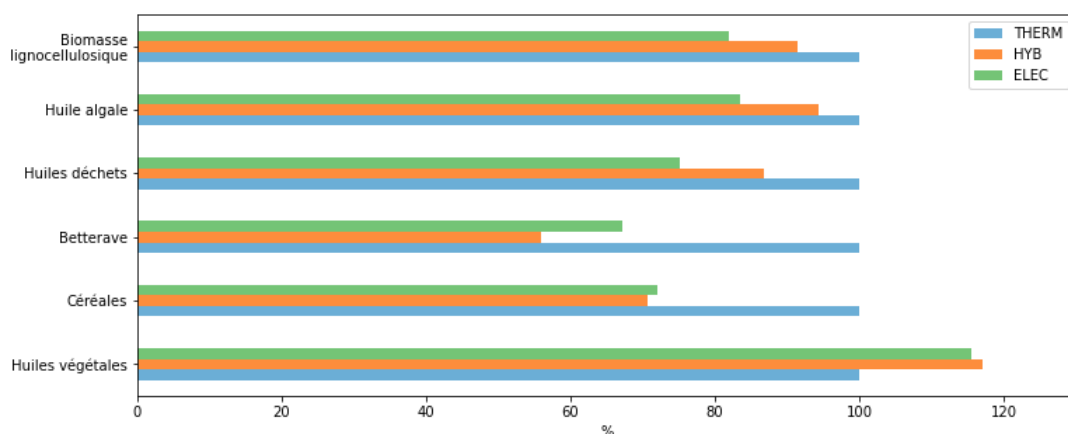


Figure 31. Variations de l'utilisation des ressources biomasse en 2050, relativement au scénario THERM

D'une manière générale les scénarios ELEC et HYB mobilisent significativement moins de ressources biomasses avec une exception pour les huiles végétales qui, malgré une hypothèse de la part du mix de filières biodiesels conventionnelles similaires dans les 3 scénarios, apparaissent un peu plus fortement mobilisées dans ELEC (+15%) et HYB (+17%) du fait d'une substitution du pool gazole quasi intégralement assurée par les biodiesels – tandis que le scénario THERM bénéficie d'une part majoritaire de biogazole de type efuel.

Cette vision comparative des scénarios confirme également la forte divergence de recours aux biocarburants du pool essence avec un recours nettement moindre dans les scénarios ELEC et HYB aux ressources céréales et cultures sucrières pour la production d'éthanol. Le scénario HYB mobilise une quantité légèrement plus faible de ces ressources par rapport à ELEC car avec un parc de véhicules thermiques essence encore présent, les investissements dans les unités éthanol lignocellulosiques y sont privilégiés impliquant une part plus faible de bio-essences conventionnels dans le mix (voir Figure 18).

Les ressources pour la production de biogaz (déchets méthanisables, maïs dédié et CIVE) non représentées ici, sont mobilisées en quantités similaires dans les trois scénarios.

L'utilisation détaillée de chacune de ces familles de ressources biomasses est analysée dans les sous-sections suivantes.

3.5.1. Ressources pour biocarburants conventionnels

Pour les biocarburants conventionnels, on note Figure 32 une évolution à la baisse de l'utilisation de cultures oléagineuses (colza, tournesol) pour la production d'huiles végétales (pour les technologies EMAG et HVO). Jusqu'à 2035, période durant laquelle le besoin en ressources pour les technologies actuelles de biocarburants (EMAG, HVO) continue à augmenter, la croissance de la demande en huiles est assurée par les huiles de types déchets (voir Figure 35).

A noter que la production française chiffrée ici à 0,75 Mt d'huiles issues de graines oléagineuses locales correspond aux volumes mobilisés en 2019 pour la production de biodiesels. L'importation d'huiles végétales pour la production locale de biodiesel a historiquement été établie dès l'origine du développement de la filière dans les années 2000. Si la production locale n'est pas vouée à augmenter

elle devra être compensée par des importations d’huiles ou de biodiesels. Leur part est cependant vouée à nettement diminuer et pourrait également être remplacée par la mise en place de nouvelles cultures oléagineuses aux débouchés alimentaires limités comme la caméline ou encore brassica carinata qui font l’objet d’un développement en Europe de l’Est et en Amérique du Nord.

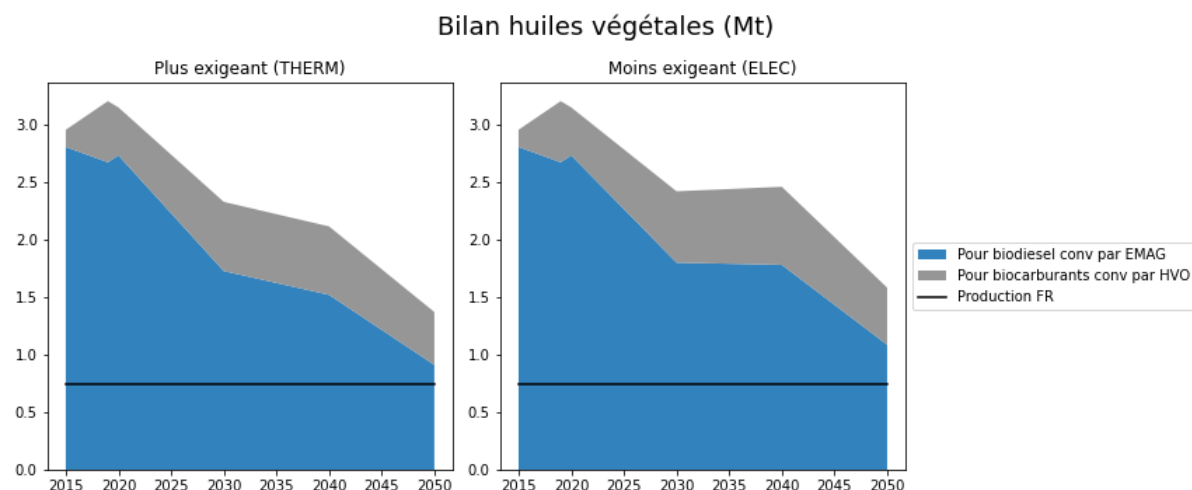


Figure 32. Trajectoires de mobilisation des huiles végétales pour la production de biodiesel dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes d’huile.

Parmi les cultures sucrières mobilisées pour la production d’éthanol à destination du pool essence on compte essentiellement la betterave sucrière produite en France et dans une moindre mesure la canne à sucre issue des DOM-TOM ou de l’importation (Figure 33). Le scénario THERM implique une stabilisation de l’utilisation de cette ressource, voire une légère diminution, la croissance de la demande en bio-essence du scénario pouvant être assurée par d’autres filières en fin d’horizon.

Le scénario ELEC quant à lui propose une réduction progressive de l’utilisation de cette ressource entre 2020 et 2050 car la part de véhicules thermiques diminue fortement.

La filière éthanol de betterave ne rencontre ainsi pas d’enjeu particulier d’approvisionnement dans ces scénarios.

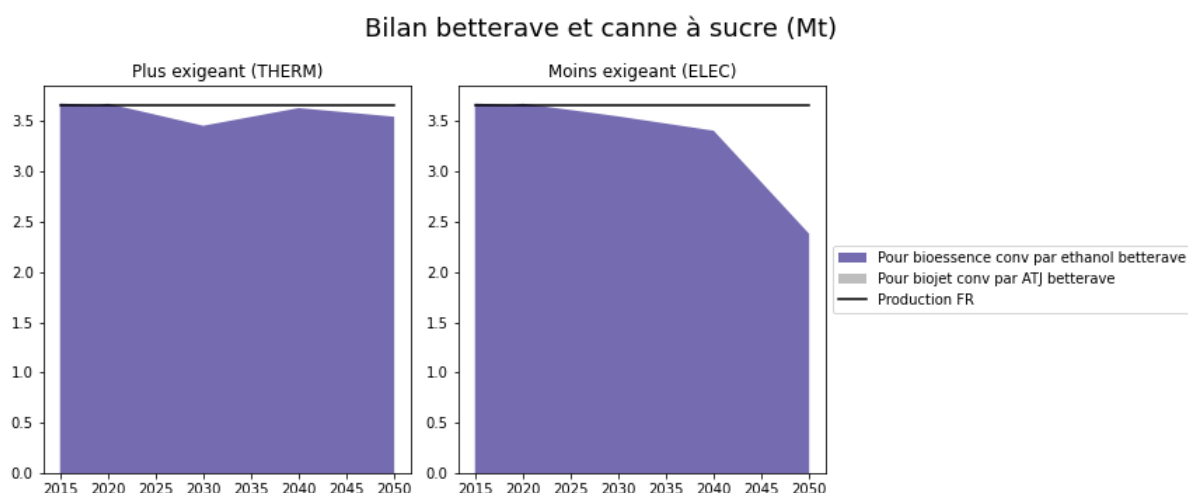


Figure 33. Trajectoires de mobilisation des cultures sucrières pour la production d'éthanol conventionnel dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes de culture.

Parmi les filières de production de bio-essence, figure également l'éthanol de céréales appartenant à la même catégorie REDII de biocarburants « conventionnels » que l'éthanol de betterave. C'est aujourd'hui la principale voie de production d'éthanol en France. C'est donc cette filière qui a été choisie pour répondre à la croissance de la demande en bio-essence jusqu'en 2030, avant l'arrivée significative des biocarburants avancés. La croissance est ensuite ralentie entre 2030 et 2040 pour les deux scénarios avec l'arrivée des autres filières de substitution (éthanol lignocellulosique et e-essence). Pour le scénario THERM la demande reste croissante jusqu'en 2050, relativement à la croissance de la demande en bio-essence qui atteint 85% d'incorporation en 2050. Pour le scénario ELEC, la demande en éthanol de céréales se retrouve réduite en dessous de son niveau actuel du fait de la baisse globale de la demande en bio-essence induite par la forte réduction du parc de véhicules essence.

Cette ressource, et notamment la culture du maïs, est également sollicitée pour la production de biogaz par méthanisation. Etant donné le besoin croissant et la part autorisée de cultures dédiées dans les méthaniseurs, même si le taux tendanciel de 5% est en dessous du maximum légal, il conduit à une nette augmentation de la quantité de céréales à mobiliser. A noter que c'est ici la demande du biogaz hors secteur transport (en vert clair) qui affiche le taux de croissance le plus élevé sur la période.

La production française illustrée sur les graphiques par la ligne noire correspond à la quantité de céréales mobilisée en 2019 pour la production d'éthanol carburant. La demande supplémentaire au-delà de 2022 peut dans une certaine mesure être assurée par la production française dont les niveaux de productivité sont en constante progression, comme dans le scénario ELEC. Néanmoins la forte hausse issue de la demande en biogaz tous secteurs confondus est induite par une hypothèse forte de substitution totale de la demande en gaz naturel par du biométhane en 2050. Cette hypothèse pourrait être à discuter dans un contexte où certaines ressources, notamment de type alimentaires, viendraient à être fortement sollicitées comme dans le scénario THERM. Pour ce dernier, l'hypothèse d'une plus forte part d'éthanol lignocellulosique dans le mix de bio-essence pourrait également être discutée en vue de réduire la demande de céréales pour éthanol carburant (voir section suivante).

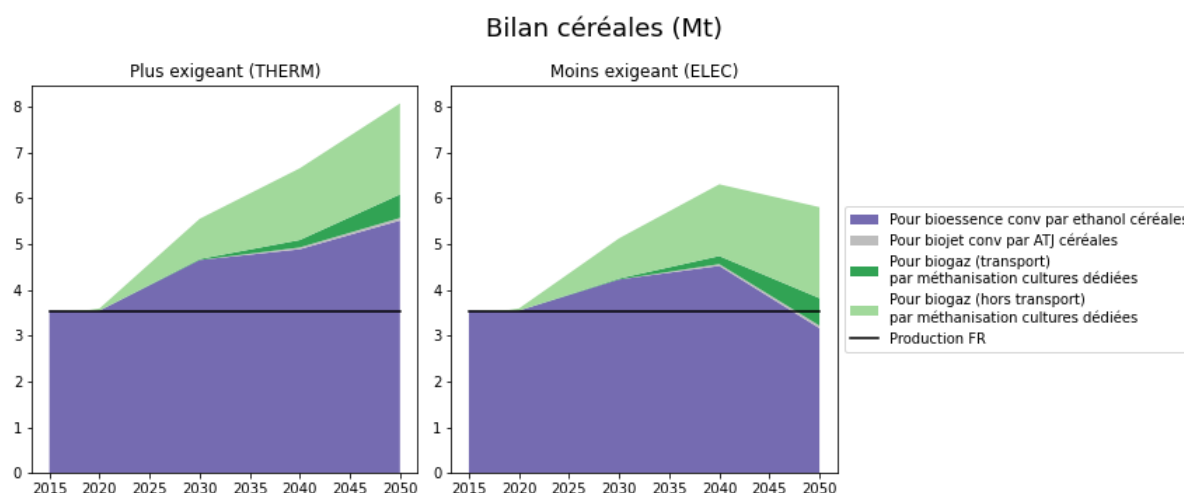


Figure 34. Trajectoires de mobilisation des céréales pour la production d'éthanol conventionnel dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes de culture

Malgré la prise en compte d'une limite maximum d'incorporation exigée par la directive REDII à partir de 2020, une augmentation du recours aux céréales se retrouve permise par le biais d'une modification annoncée de la règle de calcul du taux d'incorporation des énergies renouvelables dans le secteur transport dans cette même directive actuellement en cours de révision. Avant 2020 les taux d'incorporation étaient calculés sur la base de la seule consommation des carburants des transports routiers et ferroviaires, tandis que d'ici 2030 ils seront calculés sur la base de la somme des énergies consommées dans l'ensemble des modes de transport. Un même taux d'incorporation permettra ainsi l'utilisation d'une quantité supérieure de biocarburants conventionnels d'environ +30% entre 2019 et 2030 dans les scénarios THERM et ELEC.

3.5.2. Ressources pour biocarburants « avancés » et « autres »

Pour les biocarburants à base d'huiles de cuisson et graisses usagées (technologies EMAG et HVO) appartenant à la **catégorie « autres »** de la Directive REDII (annexe IX-B), la France dispose d'un gisement en ressources limité qui a conduit dès l'émergence de la filière au recours aux importations. La Directive REDII limite par ailleurs l'usage des huiles de cuisson usagées et des graisses animales jusqu'à un seuil maximum de 1,7% de l'énergie consommée dans les transports à horizon 2030.

Par ailleurs, depuis 2022, d'autres types d'huiles usagées (graisses de flottaison, effluents d'huilerie de palme, boue d'épuration, autres déchets industriels...), actuellement non limitées par la réglementation ont fait leur apparition dans le mix de ressources pour biodiesels EMAG et HVO. Si elles ne font pas officiellement partie de cette catégorie « autres » nous les intégrons parmi les huiles déchets mais sont en mesure d'alimenter la production de biocarburants de la catégorie « avancés ». La mise à jour de leur statut parmi les biocarburants « autres » ou « avancés » devrait être clarifiée dans le courant de l'année 2023.

S'agissant à horizon 2030 de la filière la plus mature industriellement pour atteindre les objectifs d'incorporation de biokérosène on observe, malgré ces contraintes, une croissance de la demande « biocarburants autres par HVO » (Figure 35) nécessitant un doublement du recours aux huiles et graisses usagées entre 2020 et 2030. Cette croissance de la demande 2030 en ressources de l'annexe

IX-B est ici capée par le seuil réglementaire d'incorporation maximum de 1,7% de la demande totale en énergie du secteur transport imposé par la REDII. Au-delà de 2030, la croissance de la demande en biokérosène peut être assurée via d'autres technologies faisant appel aux biomasses lignocellulosiques ralentissant ainsi la croissance de la demande en huiles et graisses usagées. Le scénario THERM marque néanmoins une croissance soutenue jusqu'en fin d'horizon du fait d'une demande en biodiesels encore significative. Un tel jeu d'hypothèses conserve ici une situation de dépendance aux importations avec une incertitude quant au potentiel réel de collecte de l'ensemble des huiles usagées au niveau français à ces horizons, ici illustré par la ligne noire du graphique en regard des hypothèses du Tableau 3.

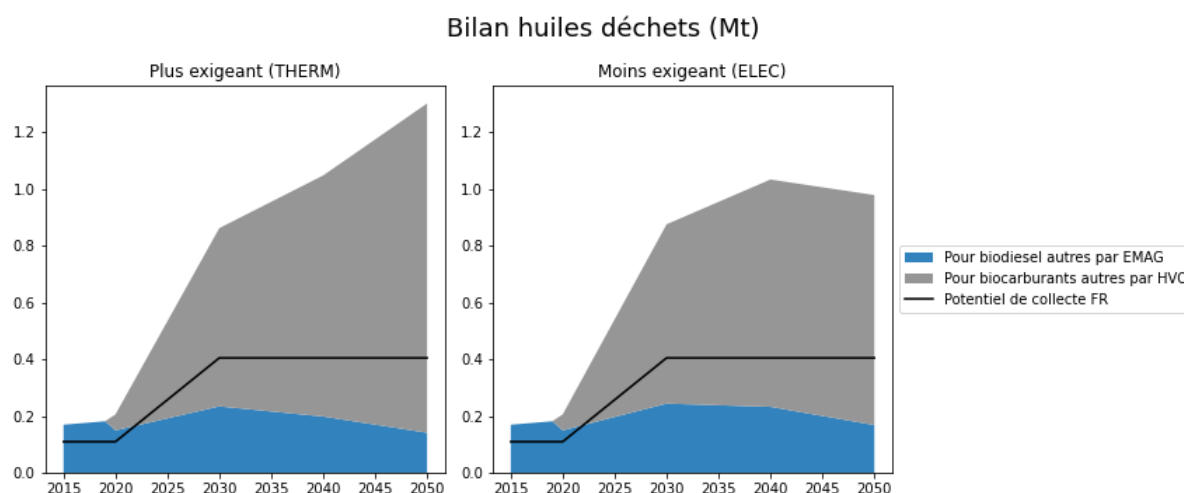


Figure 35. Trajectoires de mobilisation des huiles et graisses de type déchets pour la production de biodiesels et biokérosène dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes d'huiles

Parmi les **biocarburants avancés** on retrouve des biocarburants de technologie dite de première génération (EMAG, HVO, Ethanol 1G) mobilisant des ressources de type déchets ou sous-produits industriels telles que les graisses de flottaison, les effluents d'huileries, les huiles de tall de papeterie, etc. intégrés dans le graphique précédent. On retrouve également les marcs de raisin, lies de vins et autres résidus viniques pour la production d'éthanol. En 2022, la mobilisation de ce type de ressources s'est élevée à environ 260 000 tonnes (selon les statistiques publiques [CarbuRe](#) du Ministère de la Transition Ecologique). Le chiffrage de leur potentiel mobilisable à 2050 est détaillé précédemment dans le Tableau 3, soit environ 550 000 tonnes de résidus (hors graisses animales et huiles usagées faisant partie des ressources pour biocarburants « autres ») mais il s'agit d'une estimation pouvant être évolutive au gré des marchés des produits principaux et pouvant être affinée auprès des professionnels de la filière.

Cette catégorie de ressources est considérée comme mobilisée en premier lieu pour répondre aux objectifs et hypothèses de déploiement des biocarburants avancés à chacun des pas de temps des scénarios. Une fois le potentiel intégralement mobilisés ce sont les technologies lignocellulosiques qui sont ensuite mises en œuvre.

Parmi les biocarburants avancés liquides on compte également les biocarburants de technologie dite de deuxième génération (éthanol lignocellulosique ou 2G, BtL, e-BtL, ATJ lignocellulosique ou 2G), mobilisant la biomasse lignocellulosique. Parmi ces biomasses on considère les résidus d'exploitation forestière et sous-produits du bois, les résidus de récolte agricoles et de taille, les cultures

lignocellulosiques pérennes et la part organique des CSR. A noter que ces ressources sont également mobilisables pour d'autres usages énergétiques que le transport comme la production de chaleur/cogénération et de biométhane par pyrogazéification notamment.

Pour le secteur transport le recours aux biomasses lignocellulosiques dans les scénarios se développe progressivement à partir de 2025 en premier lieu pour répondre à la demande en biokérosène et biodiesel par la voie BtL. La filière éthanol lignocellulosique émerge significativement à partir de 2030 en particulier dans le scénario THERM où le parc de véhicules thermiques reste le plus important. La filière biométhane par pyrogazéification mobilise également une part croissante de ces ressources à partir de 2040.

Si le seul secteur transport ne semble pas induire de tension particulière sur les ressources biomasses lignocellulosiques disponibles, pour le scénario THERM, la demande pour ces ressources à horizon 2050 se retrouve plus proche du potentiel minimum de mobilisation des ressources de type déchets (hors cultures dédiées pérennes) estimé à l'échelle française (Figure 36). En ajoutant la demande potentielle de ces ressources pour les autres usages énergétiques comme la production de chaleur/cogénération (telle qu'envisagée dans le scénario S3 de l'ADEME), le potentiel minimum hors cultures dédiées est atteint dès 2035 (Figure 37). A 2050, c'est le potentiel maximum hors cultures dédiées qui se trouve mobilisé dans le scénario THERM. Ainsi dans ce scénario on observe que des risques de tensions potentielles sur les ressources lignocellulosiques peuvent apparaître en fin d'horizon sans le recours au déploiement de cultures dédiées pérennes telles que miscanthus, switchgrass ou autres cultures pérennes à croissance rapide.

Le scénario ELEC présente quant à lui un risque de tensions plus limité. Le cumul des demandes énergétiques en biomasse pourrait dépasser le potentiel de mobilisation minimum français exigeant ainsi la mise en place de mesures spécifiques pour développer un potentiel supérieur sans pour autant atteindre la trajectoire de potentiel maximum.

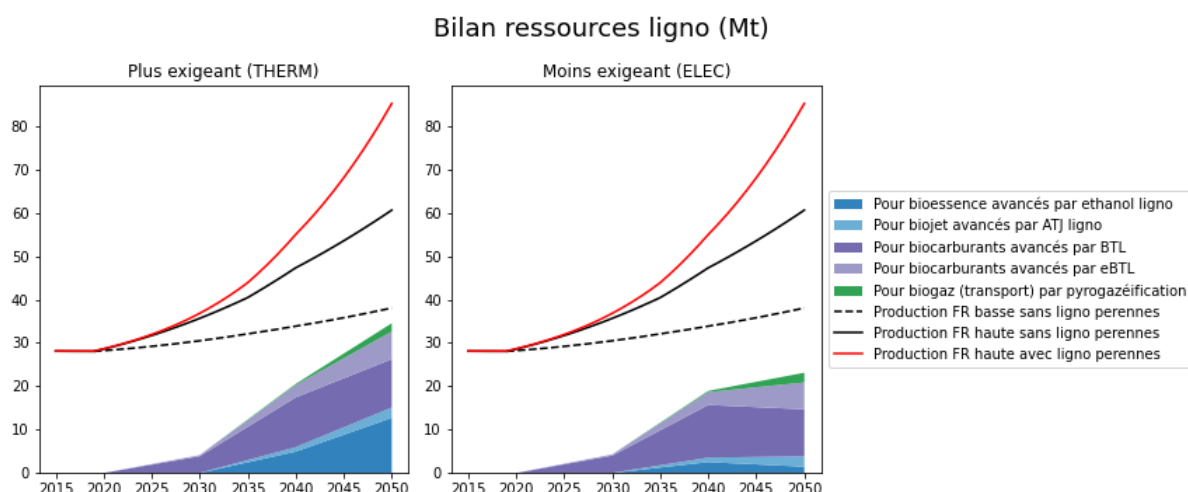


Figure 36. Trajectoires de mobilisation des biomasses lignocellulosiques pour la production de biocarburants avancés dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes matière sèche de biomasse.

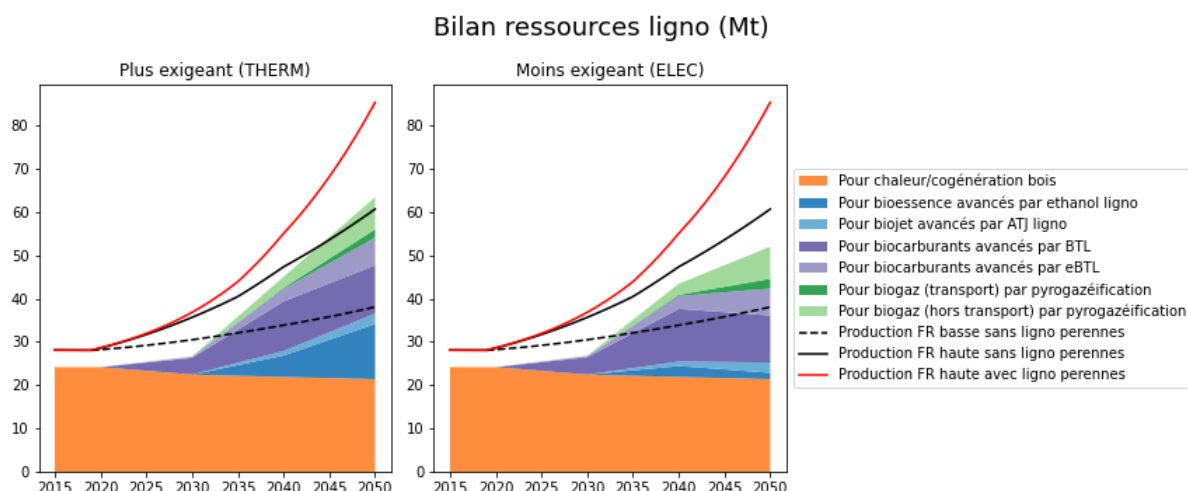


Figure 37. Trajectoires de mobilisation de biomasse lignocellulosique pour la production totale d'énergie dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes matière sèche de biomasse.

Cette analyse indique ainsi que les hypothèses retenues pour la définition de la trajectoire « Min » de disponibilité de la biomasse lignocellulosique, avec mise en œuvre limitée des moyens d'accès aux ressources et sans mise en place de cultures lignocellulosiques, ne permettent pas de répondre à la demande totale en biomasse énergie attendue à partir de 2035 dans ces scénarios « neutralité carbone ».

La trajectoire « Max » permet quant à elle d'assurer la demande en biomasse du scénario ELEC sans nécessaire recours aux cultures pérennes. Le scénario THERM requière quant à lui l'ensemble des ressources de la trajectoires Max hors cultures pérennes, ces dernières pouvant cependant être mise en place pour sécuriser les approvisionnements et baisser la pression sur les ressources déchets en fin d'horizon, mais sur des surfaces qui pourront restées relativement faibles.

A noter que ces observations restent relatives aux hypothèses strictes des scénarios ici décrits complétés du scénarios S3 de l'ADEME pour la partie chaleur/cogénération et biométhane hors transport. Des observations différentes pourraient être faites dans des contextes différents d'atteinte de la neutralité carbone en France.

Parmi les biocarburants avancés on compte également les biodiesels et biokérosènes issus d'huiles algales provenant de la culture de microalgues lipidiques. Compte-tenu d'un TLR encore faible pour des applications énergétiques, ce type de ressources n'est mobilisé de façon significative qu'à partir de 2040 dans ces scénarios et dans des volumes encore limités à horizon 2050 (<0,5 Mt).

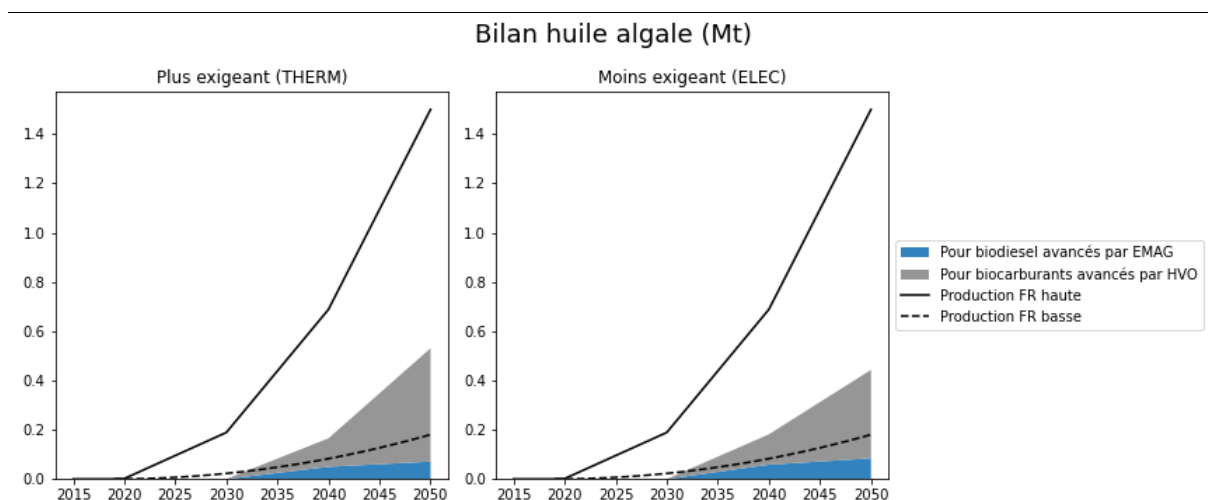


Figure 38. Trajectoires de mobilisation des huiles issues de microalgues lipidiques pour la production de biodiesels et biokérosène dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes d'huiles.

Ainsi dans tous les scénarios, la demande en microalgues pour application biocarburants se situe entre les potentiels maximum et minimum identifiés. Si le potentiel Max apparaît important et loin d'être atteint à 2050, les scénarios ici analysés comptent cependant sur l'émergence de cette filière pour alimenter en ressources une partie des demandes en biodiesels et biokérosènes attendues à partir de 2040. Sans l'émergence de cette filière, d'autres types de ressources de type huiles, graisses ou lignocelluloses, seraient à mobiliser à la place. A l'inverse, compte tenu du large potentiel de cette filière, si les verrous économiques et énergétiques venaient à être levés dans le temps imparti, un plus fort recours aux filières EMAG et HVO issus d'huile algale permettrait de réduire significativement les éventuelles tensions sur les autres ressources comme sur les importations d'huiles déchets et sur les ressources lignocellulosiques du scénario THERM notamment.

3.5.3. Ressources pour la méthanisation

La production de biogaz par méthanisation mobilise trois familles de biomasses telles que les déchets organiques méthanisables (effluents agricoles (majoritairement d'élevage), déchets verts urbains, déchets organiques ménagers, déchets organiques industriels), des cultures dédiées comme le maïs en proportion limitée par la réglementation, ainsi que les cultures intermédiaires à vocation énergétiques (CIVE) (voir section 2.3.1). L'ensemble de ces catégories de biomasses dispose d'un potentiel de mobilisation difficile à estimer car dépendant de nombreux facteurs comme l'évolution des habitudes de consommation alimentaires (notamment la diminution du cheptel bovin), les capacités de tris par les opérateurs, le développement ou la disparition d'autres filières de valorisations. Les valeurs et observations réalisées ici sont donc directement liées aux hypothèses retenues et pourraient être rediscutées sur la base de mise à jour régulières des estimations de gisements et potentiels de collecte.

Par rapport aux gisements évalués en Section 2.3.1, le potentiel de production de biogaz par méthanisation de ces différentes ressources est détaillé dans le Tableau 11.

	Gisement disponible (Mt MB)	Potentiel biogaz (Mtep)
Effluents d'élevage	131,6	3,36
Coproduits IAA	16,8	1,24
Boues de STEP	5,28	0,36
Déchets ménagers et biodéchets	13,7	1,02
Déchets verts	4,8	0,45
CIVE	[11,1-20,9]	[2,31-4,37]

Tableau 11. Potentiel de production de biogaz des ressources méthanisables

Dans les figures suivantes le bilan des ressources mobilisées est exprimé en Mtep de biogaz.

La mobilisation des biomasses méthanisables pour la production de biométhane dédié au transport se développe progressivement à partir de 2030 et représente un maximum de 2,5 Mtep de biogaz en 2050 pour le scénario ELEC (contre 2,1 Mtep dans THERM), soit 42% du gisement de déchets organiques méthanisables et entre 25% et 30% du potentiel en incluant les gisements CIVE haut et bas.

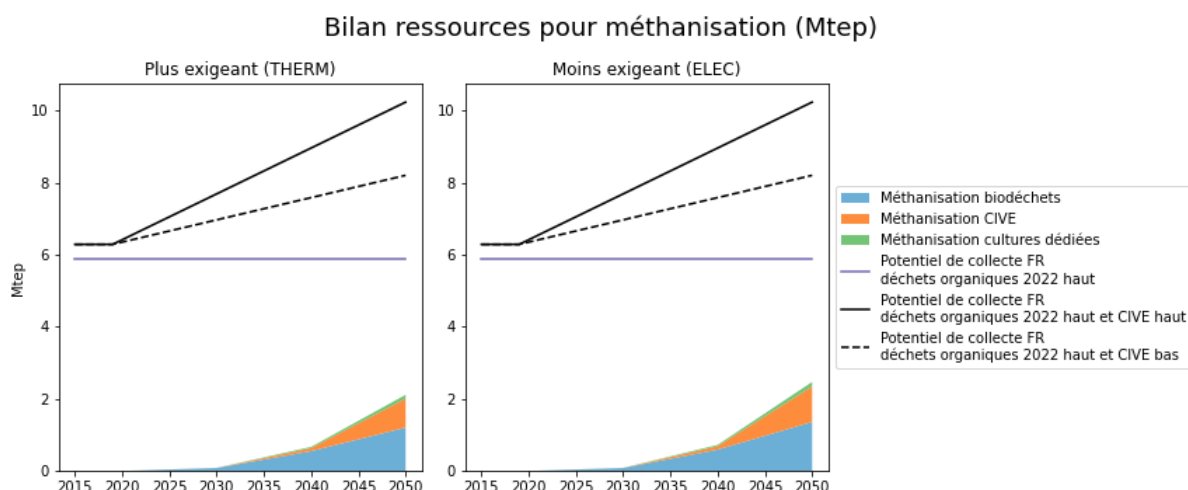


Figure 39. Bilan ressources pour méthanisation en Mtep de biogaz (secteur transport uniquement)

Comme vu dans la Figure 27, si on inclut des besoins additionnels en biométhane des autres secteurs au secteur transport, à savoir l'utilisation pour l'injection sur le réseau et pour la cogénération, la consommation globale s'élève à 10,3 Mtep (THERM) et 10,6 Mtep (ELEC) de biogaz et le secteur transport représente environ 20% de cette demande totale.

On note sur la Figure 40, que si l'on ajoute ces demandes additionnelles, à partir de 2040 le potentiel de déchets organiques identifié est intégralement mobilisé. Sur cette figure, l'horizontale violette matérialise la limite de l'offre définie dans le Tableau 4. Elle se confond avec le potentiel maximal atteint par contrainte. Le recours aux CIVE s'avère donc nécessaire. En 2050, on mobilise aussi la quasi-totalité du potentiel haut des CIVE.

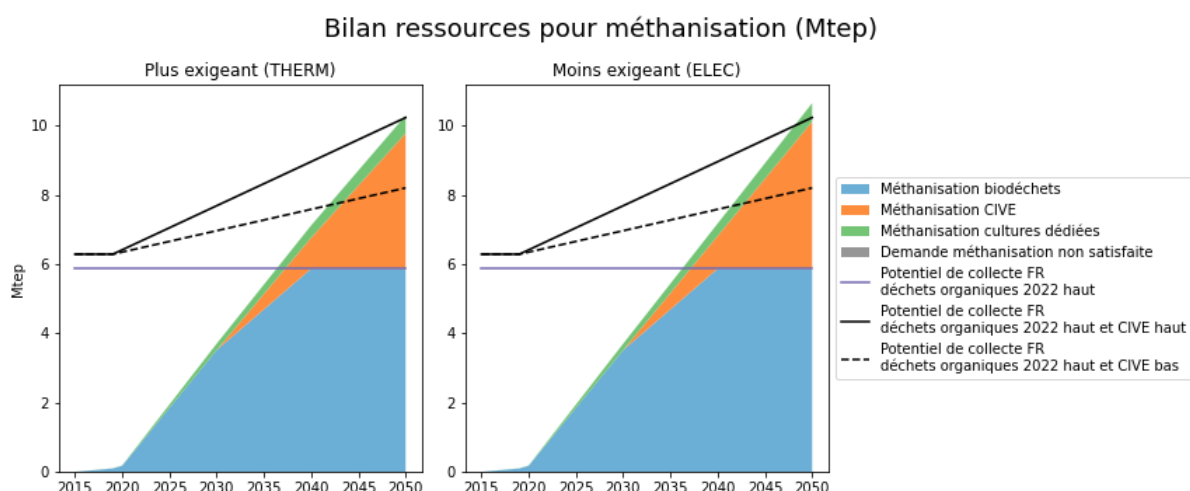


Figure 40. Bilan ressources pour méthanisation en Mtep de biogaz (secteur transport + autres usages du biogaz)

Comme indiqué précédemment concernant la mobilisation des céréales, si le poids de la demande du secteur transport reste limité, la forte hausse de la demande en ressources pour la production de biogaz par méthanisation tous secteurs confondus est induite par l'hypothèse d'une part importante de la production de biométhane par méthanisation en regard des autres solutions technologiques et surtout une hypothèse forte de substitution totale de la demande en gaz naturel par du biométhane en 2050. Ces hypothèses pourraient être à discuter dans un contexte où certaines ressources, notamment mobilisant des surfaces agricoles, viendraient à être fortement sollicitées comme dans ces scénarios. Le mix technologique de production de méthane renouvelable pourrait être élargi via des filières de type Power-to-Gas ne mobilisant pas de biomasse. Par ailleurs, même si l'idée de cette étude est d'analyser les impacts de l'atteinte d'objectifs ambitieux de décarbonation, l'option du maintien d'une part de gaz naturel fossile dans le mix gazier reste envisagée dans certains exercices prospectifs. Cette part fossile et leurs émissions de GES induites sont dans ces exercices compensées par des solutions de puits de carbone, au même titre que les émissions associées au carburants fossiles des secteurs de l'aéronautique.

4. Variantes sobriété

On a vu dans le chapitre précédent que les trois scénarios technologiques considérés conduisent à une augmentation importante de la consommation d'électricité pour le transport ainsi qu'une pression potentielle sur plusieurs ressources en biomasse, en particulier pour le scénario THERM. La mobilisation d'autres leviers que les solutions technologiques peut être explorée pour permettre de répondre de manière plus réaliste aux objectifs climatiques pour 2050.

Dans ce chapitre on s'intéresse à l'impact d'une croissance plus modérée de la demande de transport sur nos scénarios ELEC et THERM.

Cette étude n'a pas vocation à quantifier de manière précise l'impact des mesures comportementales sur la demande mais bien de démontrer de potentiels gains sur la consommation de ressources très contraintes grâce à une stabilisation (relative) de la demande de transport de passagers et de marchandises. Il donc fait ici l'hypothèse d'un taux de croissance annuel de 0,35%/an jusqu'en 2035 puis d'une décroissance au taux de -0,20%/an jusqu'en 2050 pour la mobilité des passagers et 0,26%/an pour le transport de marchandises sur l'ensemble de la période. Au regard de ces taux de croissance, ces trajectoires se situent parmi les hypothèses plutôt basses sans toutefois aller jusqu'à supposer des taux de croissance négatifs sur l'ensemble de la période considérée (comme c'est souvent le cas pour les scénarios qualifiés de « *sobres* » ou « *frugaux* », eg. scénario s1 de l'ADEME, scénario qui n'explicite pas non plus la mise en œuvre des leviers de sobriété).

4.1. Description des trajectoires sobriété

▪ Mobilité passager

La variante sobriété (SOB) étudiée ici se caractérise par une moindre croissance de la demande de mobilité (1010 Gpkm en 2050 contre 1168 Gpkm dans les scénarios de base). Celle-ci pourrait également s'accompagner d'une réduction du nombre de véhicules présents dans le parc roulant français du fait d'un certain nombre de facteurs tels que :

- un moindre intérêt pour la voiture au sein des nouvelles générations ;
- en milieu urbain, un plus grand recours aux transports en commun et aux modes actifs (vélo, marche), au détriment de la voiture.

Là où la demande de mobilité globale dans les scénarios technologiques était corrélée à l'évolution de PIB/habitant, on estime une stagnation à l'horizon 2050, comme présenté Figure 41.

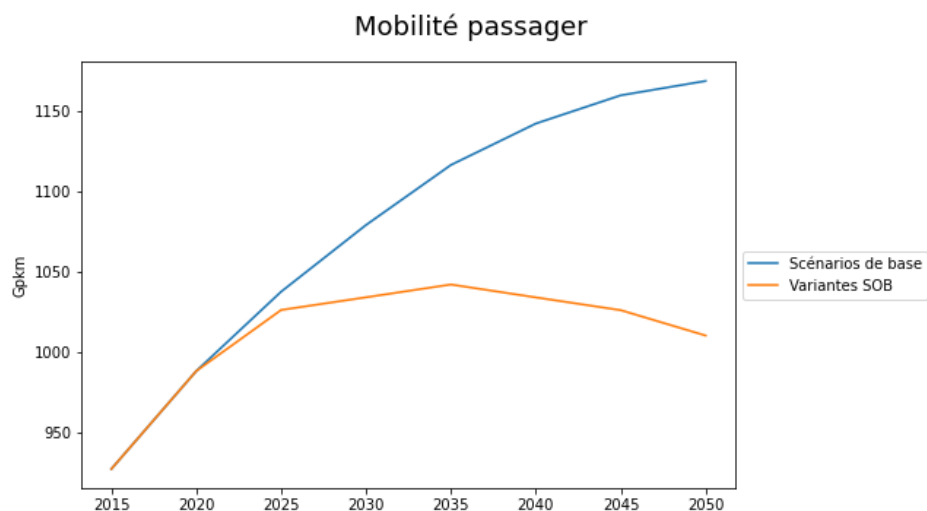


Figure 41. Demande totale de mobilité passager

La trajectoire de la demande de mobilité passagers sur la période 2020-2050 situe les variantes SOB, parmi les plus 'optimistes' quant à la possibilité de maîtriser la demande de passagers-km (voir Figure 42). Comme souligné précédemment, ces trajectoires ne vont pas jusqu'à faire l'hypothèse d'une décroissance de la demande de mobilité sur l'ensemble de la période, comme cela est le cas pour les scénarios s1 et s2 de l'ADEME.

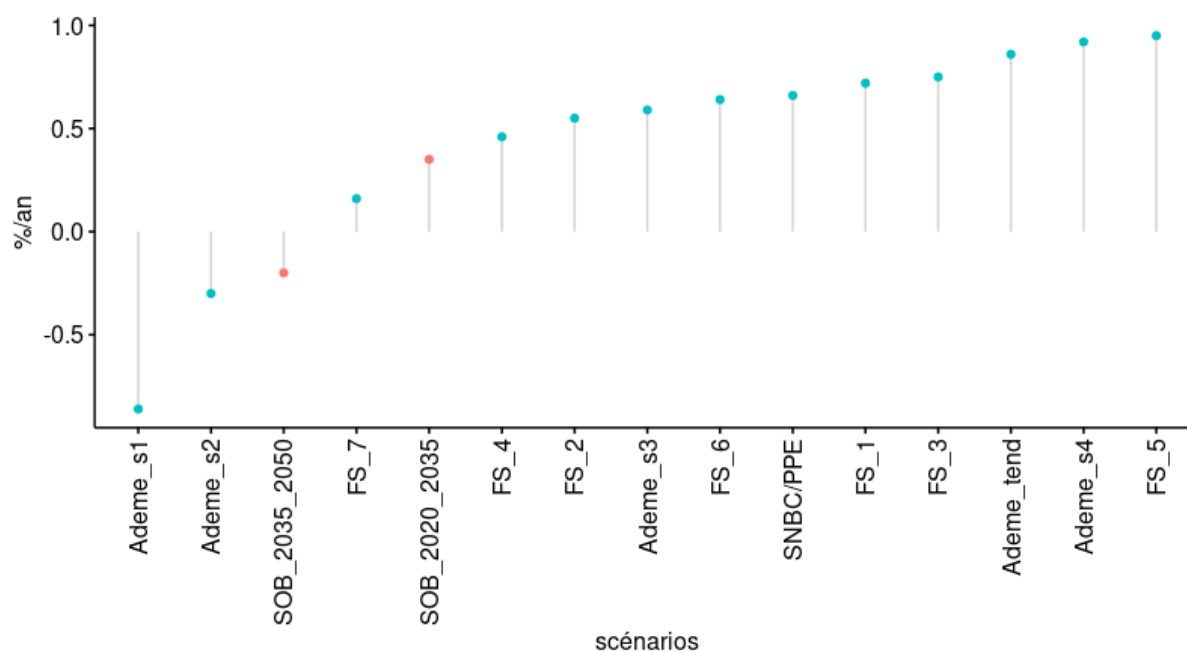


Figure 42. Taux de croissance annuel (à horizon 2050) des différents scénarios de demande de mobilité des passagers

Note: Ademe_sx: scénarios 1 à 4 de l'ADEME [4], Ademe_tend: scénario tendanciel de l'ADEME [4]; FS_x : scénarios 1 à 7 de France Stratégie [5]; SNBC/PPE: scénario de la SNBC [1]; BASE: scénario de base de l'étude ; SOB_X_X: scénario 'sobriété' de l'étude, périodes 2020-2035 et 2035-2050

Cette trajectoire se caractérise aussi par une évolution des parts modales des déplacements urbains, au détriment de la voiture et au profit de la marche, du vélo et du transport en commun légèrement plus marquée que pour les scénarios de base. De même, pour les déplacements moyennes et longues distances, du fait d'une adaptation de l'offre (matériel et infrastructures) et d'une évolution des comportements, on observerait un plus grand recours au transport collectif (train et car), ce qui impliquerait notamment la réouverture de certaines lignes de train.^{14 15}

Dans le domaine du transport aérien, on fait ici l'hypothèse que l'ensemble des vols intérieurs (i.e. métropolitains) seront, à terme, proscrits. Cette mobilité sera reportée majoritairement sur le train.

L'évolution des parts modales est présentée sur la Figure 43.

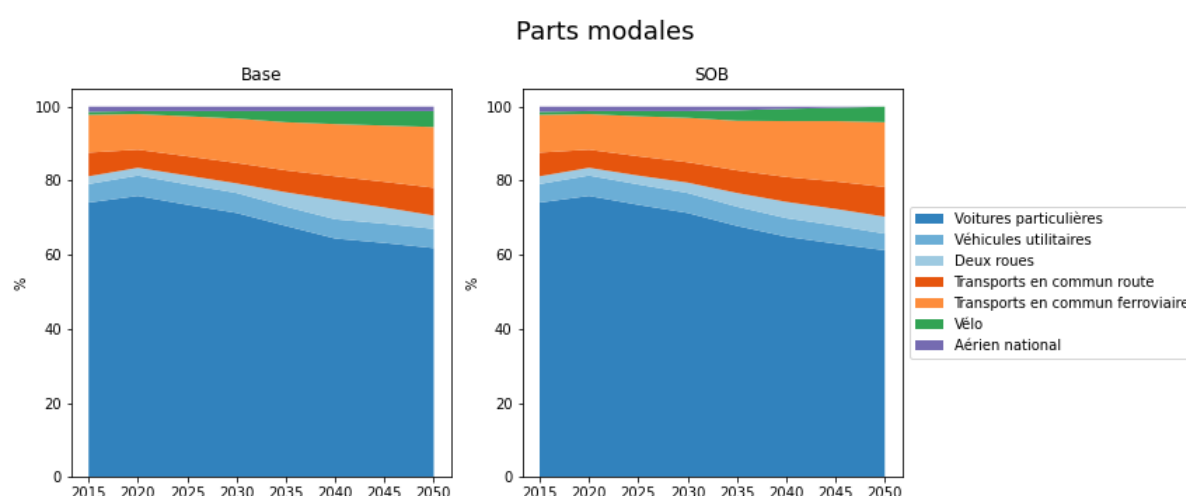


Figure 43. Parts modales du transport passager

■ Transport de marchandises

La trajectoire modérée pour le transport de marchandises se distingue moins par les technologies utilisées que par la demande de tonnes.km. Celle-ci pourrait être réduite et redistribuée spatialement du fait d'une augmentation des coûts de transports, de contraintes imposées sur certains services (eg. les livraisons rapides dont les tarifs sont indexés sur le délai), d'une évolution des comportements de consommation des ménages et du développement de certaines filières favorisant les circuits courts et l'autopartage local de certains biens ou équipements (bricolage, jardinage, ...). La tendance à une localisation des sites de production plus proche des grands marchés de consommation (à l'échelle nationale, voire régionale) et l'émergence d'une « économie de la proximité » se traduirait ainsi par une réorganisation des flux de marchandises (au profit du transport dit de « courte distance ») et donc à un infléchissement de l'évolution des tonnes-kilomètres réalisées. D'autre part, certaines mesures telles que l'autorisation du transport à la fois des personnes et de marchandises sur l'ensemble des transports routiers, guidés et fluviaux pourraient contribuer à la réduction de certains flux. L'impact de ces mesures sur le trafic de fret (exprimé en Gtkm) est présenté sur la Figure 44.

¹⁴ Il n'est pas fait ici l'hypothèse d'une évolution du taux de remplissage.

¹⁵ Il serait possible d'imaginer des quotas individuels d'usage des véhicules thermiques limitant l'usage des voitures au profit d'autres modes de transport (Raux, 2007) [26].

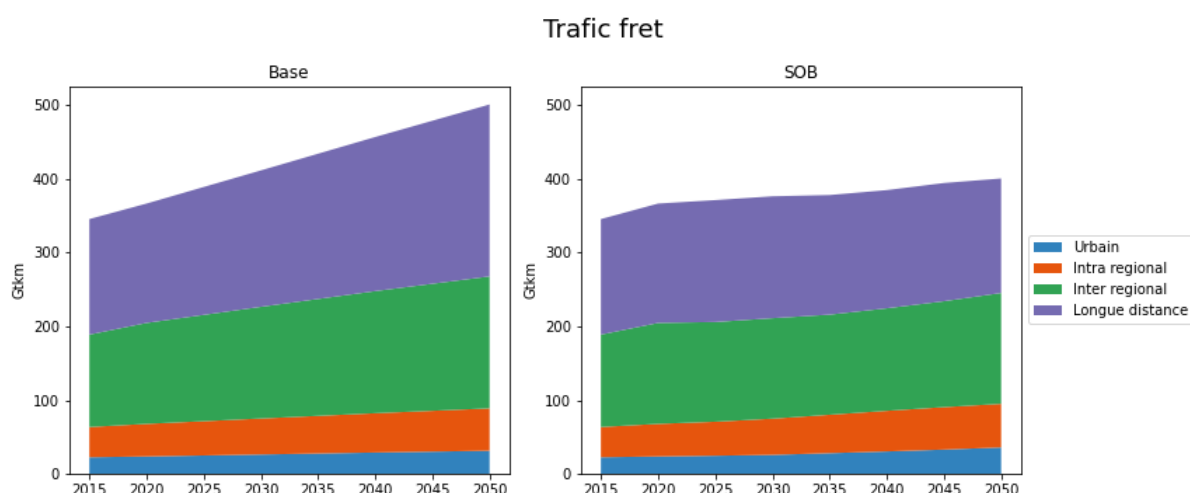


Figure 44. Demande totale de transport de marchandises (exprimée en Gt.km)

Cette trajectoire peut être qualifiée de « basse », en comparaison avec la plupart des scénarios qui supposent une croissance plus forte de la demande de transport de marchandises. Néanmoins, là encore, elle ne va pas jusqu'à faire l'hypothèse d'une décroissance de ces flux, comme le font les scénarios S1 et S2 de l'ADEME et le scénario S2 de Briand et al. (2019) (Figure 45).

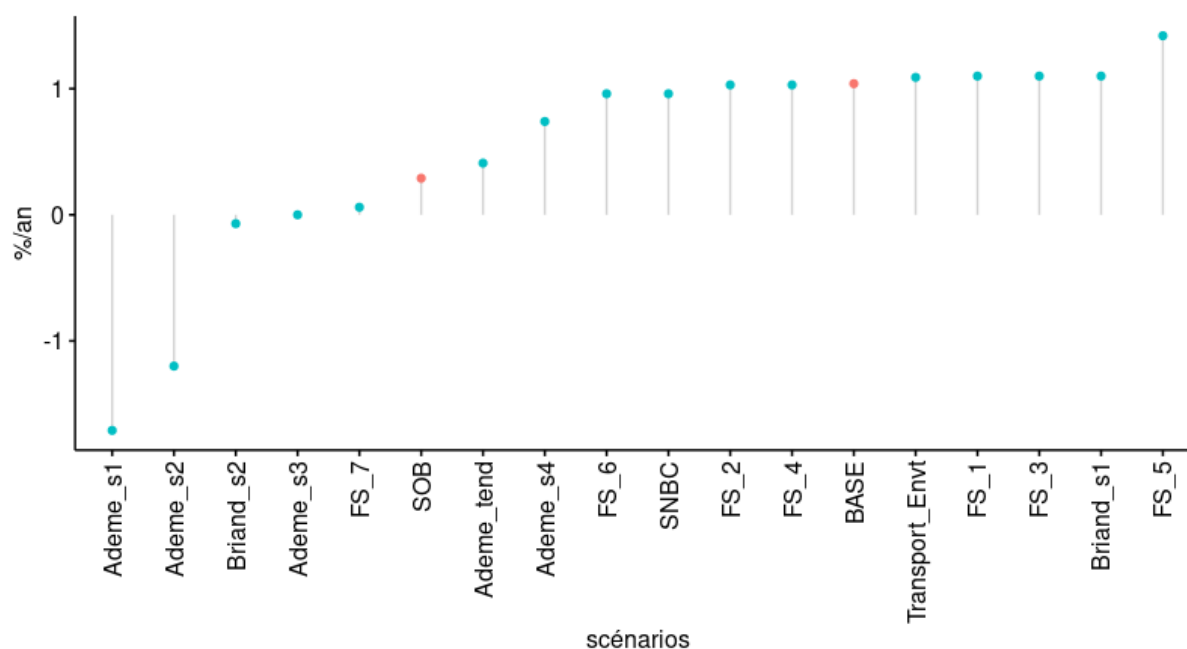
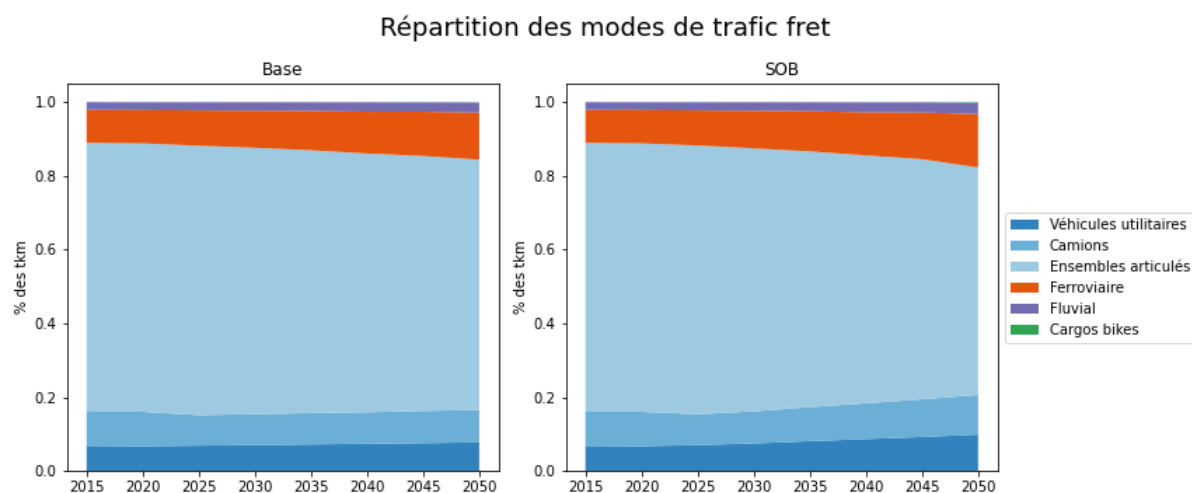


Figure 45. Taux de croissance annuel (à horizon 2050) des différents scénarios de demande de transport de marchandises

Note: Ademe_sx: scénarios 1 à 4 de l'ADEME [4]; Ademe_tend: scénario tendanciel de l'ADEME [4]; FS_x : scénarios 1 à 7 de France Stratégie [5]; SNBC: scénario de la SNBC [1]; Transport_Env: scénario de Transport & Environnement [7]; Briand_sx: scénario 1 et 2 de Briand et al. (IDRR) [6]; BASE : scénario de base de l'étude ; SOB : scénario 'sobriété' de l'étude

La répartition des parts modales est légèrement plus favorable aux transports ferroviaire et fluvial qu'elle ne l'était dans le scénario de base (cf. Figure 7). La part modale du transport ferroviaire atteint environ 14,5% en 2050 (à titre de comparaison, les scénarios supposant une décroissance du transport de marchandises se traduisent par des parts modales du transport ferroviaire plus élevées, i.e. 22% (S1 ADEME), 24% (S2 ADEME), et 34% (scénario 2 de Briand et al. (2019)).



On applique ces trajectoires SOB de demandes en mobilité incluant des mesures de sobriété aux deux scénarios principaux ELEC et THERM, ces variantes sont nommées respectivement ELEC_SOB et THERM_SOB.

▪ Autres demandes

Concernant les demandes en biomasse hors transport, si nos scénarios technologiques précédemment décrits étaient plus proches du narratif S3 de l'ADEME, cela n'est plus en adéquation avec l'approche plus modérée de la demande considérée dans cette section. Ainsi on se propose dans cette partie d'utiliser plutôt la demande en bois énergie et la demande en biométhane hors secteur transports, du scénario S2 de l'ADEME, telles que décrites dans le Tableau 12.

	2030	2050
Bois énergie pour le résidentiel, tertiaire, industrie et réseaux de chaleur	130,1 TWh	139 TWh
Biométhane hors transport	39,3 TWh	88,1 TWh

Tableau 12. Demandes en biomasse énergie hors transport (ADEME S2)

Pour conserver la logique du scénario S2 de l'ADEME, étant donné le plus grand recours au bois énergie et la diminution de la demande en méthane par rapport au S3, la part de pyrogazéification dans la production de biométhane est aussi réduite. On utilise donc dans nos variantes la répartition technologique des voies de production du biométhane de l'ADEME S2 décrites dans le Tableau 13.

	2015	2030	2050
Pyrogazéification	0%	0%	3%
Méthanisation	100%	100%	97%

Tableau 13. Voies de production du biométhane (ADEME S2)

4.2. Résultats des variantes sobriété

A l'image de l'analyse du chapitre précédent cette partie met en regard l'évolution des demandes en carburants liquides, en électricité, en hydrogène puis en biomasses des scénarios THERM et ELEC pour la variante de sobriété et la demande initiale analysée au chapitre précédent.

■ Demandes en carburants liquides

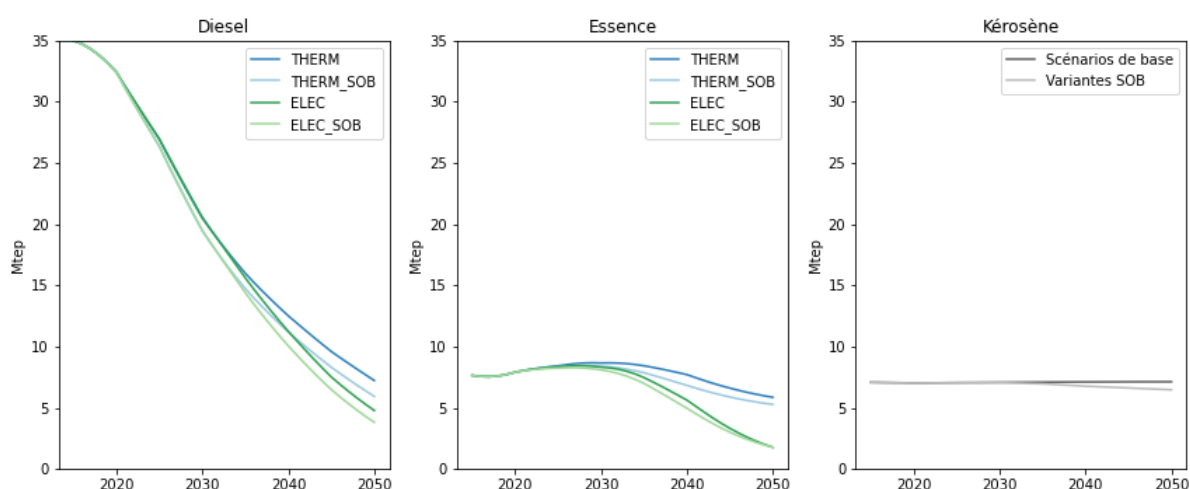


Figure 47. Consommation de carburants liquides suivant les variantes sobriété (en Mtep)

Pour la consommation de diesel, on constate que les variantes de sobriété impliquent une réduction en 2050 de 18% pour le scénario THERM et 20% pour ELEC. Concernant la demande en essence, la réduction est négligeable pour le scénario ELEC. Pour le scénario THERM, cela représente une baisse de 10%. Enfin, avec l'arrêt des vols nationaux métropole-métropole, la consommation totale de kérosène diminue de 0,65 Mtep soit environ 9%.

A l'image des résultats obtenus sur les pourcentages de baisse de demandes en carburants liquides, les variantes de sobriété induisent des réductions similaires de demande en carburants alternatifs dans des proportions relatives aux hypothèses de déploiements des biocarburants et efuels dans chacun des pools des carburants gazole, essence et kérosène.

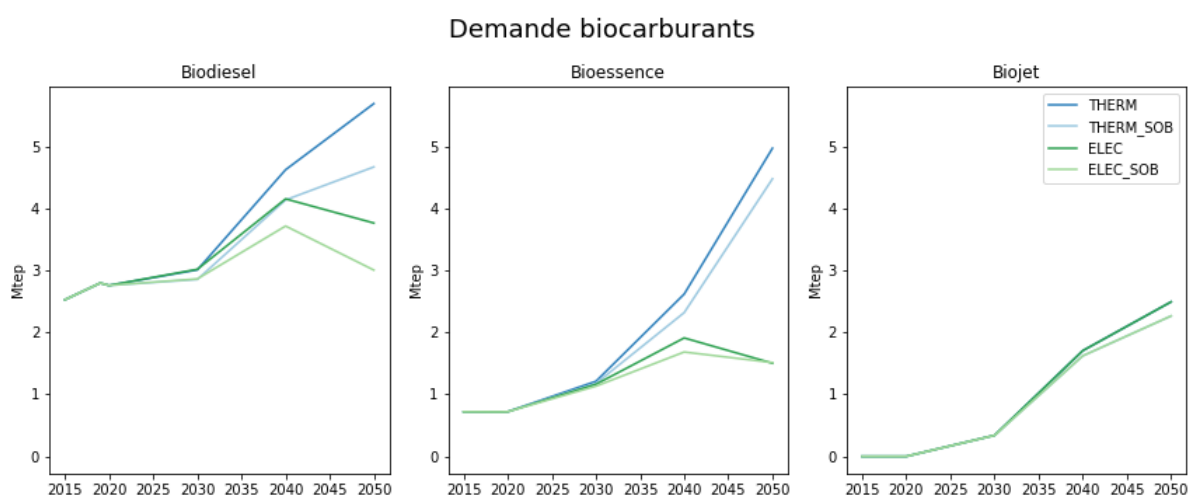


Figure 48. Evolution des consommations de biocarburants liquides suivant les variantes sobriété (en Mtep)

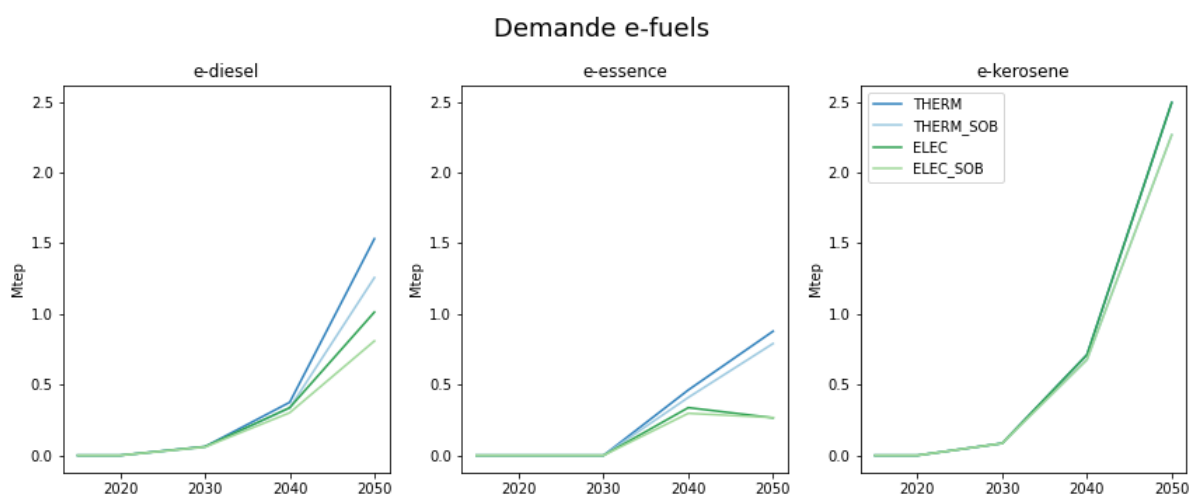


Figure 49. Evolution des consommation d'e-fuels liquides suivant les variantes sobriété (en Mtep)

Ainsi en 2050 on observe une réduction de 18% de biodiesel et e-diesel pour THERM_SOB et 20% pour ELEC_SOB. Les réductions de consommation se montrent plus modérées pour les pools essence et kérosène. La baisse de demande en bio-essence et e-essence se chiffre à 10% dans THERM_SOB. Ces réductions sont négligeables dans ELEC_SOB en fin d'horizon. Pour le pool kérosène, la réduction de demande en carburants alternatifs reste identique à -9%.

■ Demandes en hydrogène

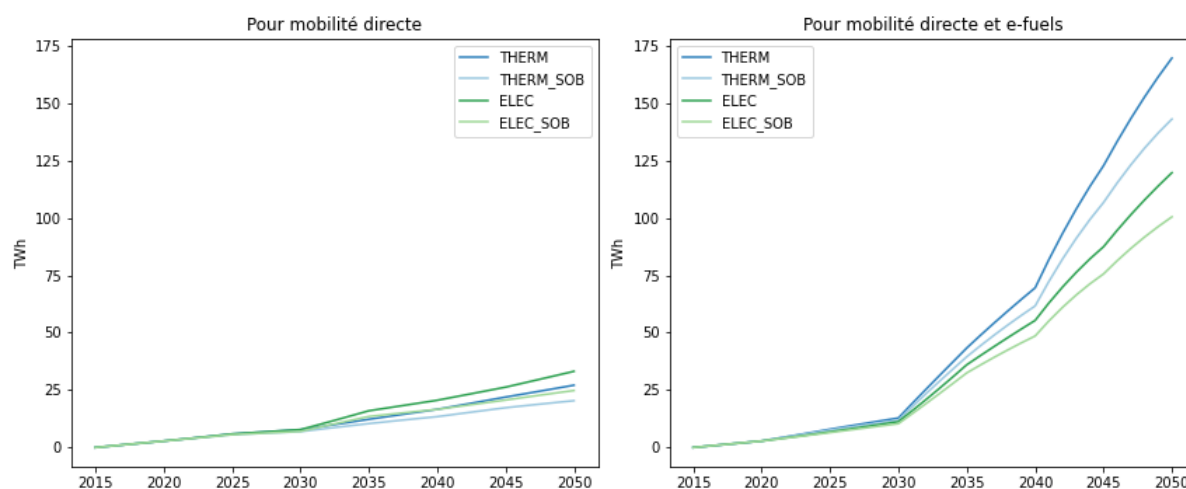


Figure 50. Demande en hydrogène du secteur transport suivant les variantes sobriété (en TWh)

Les variantes sobriété permettent une réduction de la consommation d'hydrogène pour les véhicules à pile à combustible de 25% pour les deux scénarios et de 16% pour la consommation totale en considérant les besoins pour la production d'e-fuels. Cela représente un gain total d'environ 0,6 Mt pour le scénario ELEC et 0,8 Mt pour le scénario THERM.

■ Demandes en électricité

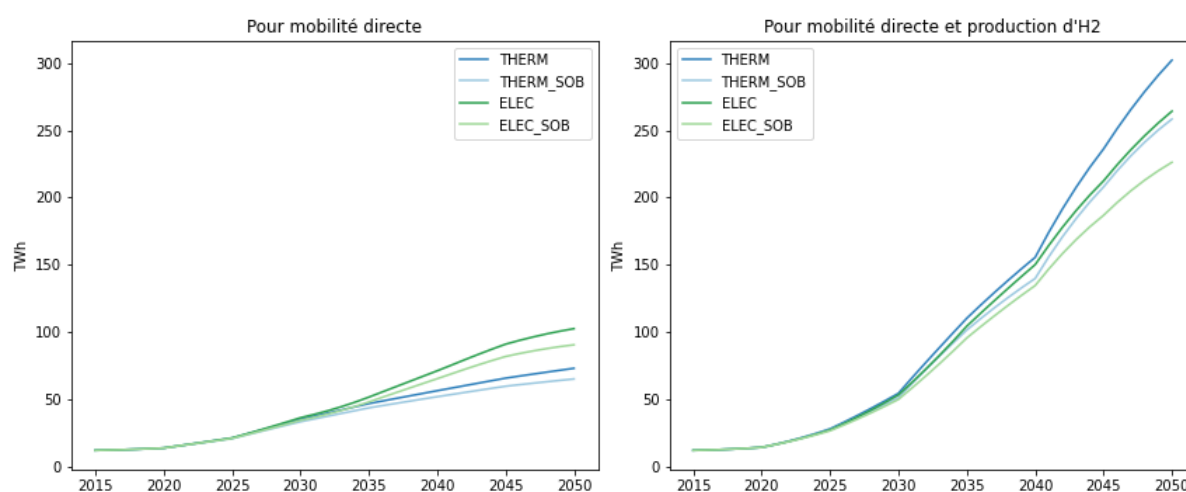


Figure 51. Consommation électrique du secteur transport suivant les variantes sobriété (en TWh)

Les variantes sobriété permettent une réduction de la consommation d'électricité pour les deux scénarios de 11% et de 15% pour la consommation incluant la production d'hydrogène. Cela

représente donc une diminution de la consommation électrique totale pour le transport de 40 TWh pour le scénario ELEC et de 45 TWh pour le scénario THERM.

■ Demandes en biomasse

Cette réduction globale de la demande permet aussi une diminution du recours à la quasi-intégralité des ressources biomasses.

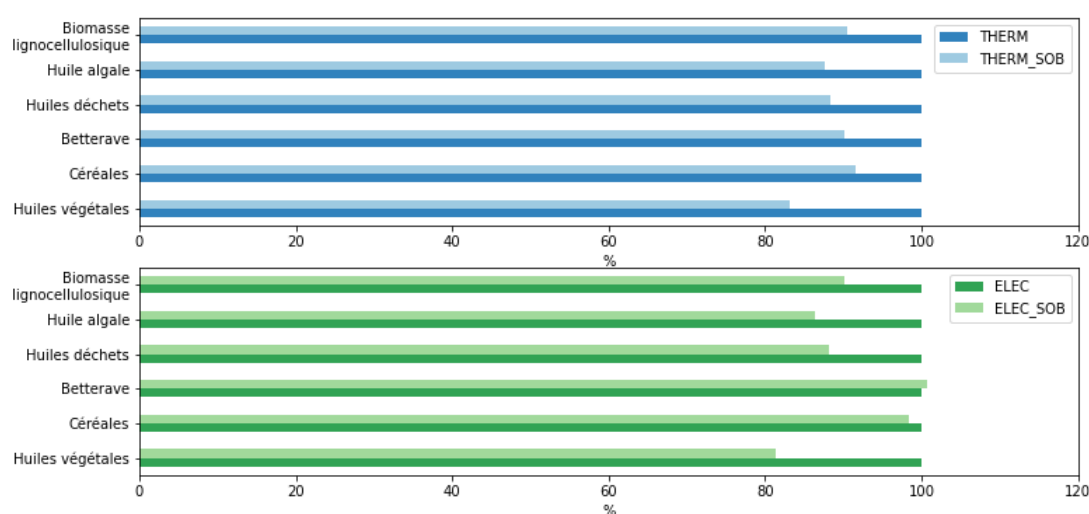


Figure 52. Variations de l'utilisation des ressources biomasse en 2050 suivant les variantes sobriété, relativement aux scénarios initiaux respectifs

D'une manière générale pour les deux scénarios les variantes de sobriété induisent des réductions de consommation plus importantes sur les ressources en huiles (huiles végétales, huiles usagées, huile algale), en cohérence avec une plus forte diminution de la demande en gazole du parc Diesel, à laquelle s'ajoute la baisse de la demande en kérosène.

Dans le scénario THERM, la variante sobriété permet de réduire la quantité de biomasse nécessaire en 2050 entre 9% et 17% suivant la ressource.

Dans le scénario ELEC, à part pour la production de bioessence conventionnelle (betterave et céréales), la réduction du besoin en biomasse est entre 10% et 19%. Cette faible augmentation de la demande en betterave (moins de 1%) est due à une légère augmentation du report modal de la voiture vers des véhicules deux roues (fonctionnant principalement à l'essence) et dont la motorisation n'est substituée par de l'électrique qu'à 35% en 2050.

A noter qu'à horizon 2050 le scénario THERM_SOB permet d'aboutir à une demande en huiles végétales proche du niveau de production nationale actuellement mobilisé pour l'énergie (soit environ 1 Mt d'huile) permettant ainsi de s'affranchir d'éventuelles importations ou mobilisation de surfaces de culture supplémentaires.

La pression sur l'importation d'huiles déchets, à savoir les volumes d'huiles et graisses mobilisées au-delà du potentiel de collecte national, est quant à elle réduite de 20% grâce au levier de sobriété (voir Figure 53 en annexe 3).

Concernant les ressources lignocellulosiques la mobilisation dédiée au secteur transport représente 49% et 76% du potentiel minimum dans les variantes sobriété de ELEC et THERM respectivement (contre 61% et 91% sans la variante de sobriété). Par ailleurs en considérant l'ensemble des usages énergétiques de la biomasse, la variante ELEC_SOB permet de rester proche du potentiel minimum à 2050 et la variante THERM_SOB permet de rester en dessous du potentiel maximum hors cultures pérennes (voir Figure 54 et Figure 55 en annexe 3). Même si le potentiel maximum en ressources biomasses avec cultures pérennes est encore loin d'être atteint en 2050 ces variantes permettent de sécuriser d'éventuelles pressions sur certaines ressources déchets comme les résidus forestiers et agricoles dont les disponibilités peuvent être inégalement réparties sur le territoire.

5. Conclusion

Tous les scénarios prospectifs présentés dans cette étude permettent d'atteindre les objectifs de la SNBC de moins de 4Mt CO₂eq en 2050 (les émissions résiduelles restantes sont compensées par les puits de carbone français). L'atteinte des objectifs est ici rendue possible en l'absence de contrainte sur l'offre électrique. Les impacts sur les ressources et les vecteurs énergétiques diffèrent grandement suivant les choix technologiques effectués sur les parcs fret et passager.

Le besoin d'électricité pour l'électrification du parc roulant va croître fortement d'ici à 2050, et même dans un scénario type THERM où l'électrification n'est pas totale, cela représente une augmentation significative par rapport aux besoins actuels. La différence avec un scénario type ELEC est ici de seulement 30 TWh.

Le besoin d'hydrogène explose quant à lui, principalement à cause de la production de e-fuels, et ce quels que soient les choix technologiques sur les parcs. Cela est notamment dû à l'hypothèse que l'offre répond à l'atteinte des objectifs européens pour l'aviation et l'incorporation de SAF pour décarboner le secteur. Cela implique donc une demande en électricité totale pour le transport qui pourrait atteindre entre 260 et 300 TWh. Cette conclusion pourrait être encore accentuée en cas de forte augmentation du trafic aérien dans les prochaines années. Au vu des forts écarts avec les travaux de RTE, la faisabilité technique et économique de cette solution reste à questionner.

Les ressources en biomasse pour les biocarburants liquides « conventionnels » sont relativement peu contraintes. On note cependant une dépendance potentiellement accrue aux importations dans un scénario type THERM concernant les huiles et graisses déchets si le potentiel de collecte national n'évolue pas à la hausse. Cette pression pourrait potentiellement être levée si la filière de production de biocarburants issus de microalgues venait à émerger. La pression reste faible sur les ressources lignocellulosiques dans un scénario type ELEC tandis qu'un scénario type THERM va demander la mise en place de moyens spécifiques pour le déploiement de chacune de ces ressources y compris la mobilisation de cultures pérennes.

L'ambition de substituer la quasi-totalité de la demande en gaz naturel envisagée par le scénario S3 ADEME par du biométhane abouti à des besoins en biomasses à la limite du potentiel haut estimé pour la méthanisation. Le seul secteur transport mobilisant quant à lui entre 25 et 30% de ce potentiel. Ce résultat reste néanmoins à nuancer en regard de plusieurs facteurs comme (i) les incertitudes relatives à l'évolution potentielle des gisements de biomasses disponibles pour la méthanisation, (ii) le déploiement des différentes technologies de production de biométhane renouvelable, (iii) ainsi que l'évolution de la demande en gaz naturel tous secteurs confondus et la part de gaz naturel fossile qu'il sera possible de substituer d'ici 2050.

Concernant l'approvisionnement en biomasses, aucun des trois scénarios étudiés ne paraît irréalisable quel que soit le niveau d'électrification du parc. Le secteur transport à lui seul ne semble pas induire de nouvelles tensions en dehors des importations d'huiles usagées. Cependant les demandes en ressources tous secteurs énergétiques confondus peuvent induire localement des contraintes d'approvisionnement potentielles sur certaines biomasses méthanisables et certaines ressources lignocellulosiques dans un scénario peu électrifié. Des concurrences d'usages et des tensions sur ces ressources seraient envisageables.

Afin de **sécuriser ces tensions potentielles et de diminuer la demande en électricité**, un levier de sobriété apparaît nécessaire en complément des évolutions technologiques étudiées. La variante sobriété permet notamment : de diminuer d'au moins 10% la consommation totale d'électricité en

2050 et d'alléger la dépendance aux importations d'huiles usagées et de supprimer la pression sur les ressources lignocellulosiques en restant en dessous d'un potentiel hors cultures pérennes en 2050.

Une des limites de cette étude est de ne pas intégrer de trajectoire d'offre sur la production électrique, alors que c'est le cas sur la biomasse. Même si l'intérêt des résultats est de montrer l'effort nécessaire à mettre en place afin d'atteindre les objectifs réglementaires de décarbonation, il reste à interroger la faisabilité de déploiement de l'offre électrique.

Suite à cette étude, les perspectives de développement suivantes ont été identifiées :

- Etudier les boucles de rétroaction entre demande électrique et capacités totales de production, ainsi celles sur les potentiels de biomasse disponibles.
- Intégrer le CO₂ en tant que ressource pour la production des e-fuels ainsi que les consommations énergétiques associées à sa capture, il sera ainsi possible d'analyser d'éventuelles tensions sur le CO₂ en tant que ressource de carbone.
- Evaluer les barrières économiques et intégrer cette dimension dans des études d'optimisation ou des études de sensibilité du déploiement des solutions aux coûts de production électrique ou aux investissements à mobiliser.
- Approfondir le volet sobriété avec l'étude d'une sobriété plus marquée et une meilleure quantification des leviers associés ainsi que leurs impacts sur les modes de vie.

Table des figures et tableaux

Figure 1. Trajectoire des émissions du secteur transport dans la SNBC (MTES).....	8
Figure 2. Taux de croissance annuel (à horizon 2050) des différents scénarios de demande de mobilité des passagers (exprimée en Gpkm)	13
Figure 3. Mobilité des véhicules particuliers : milliards de véhicules-kilomètres parcourus suivant le type de motorisation.....	14
Figure 4. Parts modales du transport passager pour les trois scénarios (en % des Gpkm)	15
Figure 5. Taux de croissance annuel (à horizon 2050) des différents scénarios de demande de mobilité des marchandises.....	17
Figure 6. Répartition des modes de trafic du fret	17
Figure 7. Part modale du transport ferroviaire en 2050 des différents scénarios de demande de transport de marchandises	18
Figure 8. Evolution de la part des motorisations pour le fret routier suivant les scénarios	19
Figure 9. Evolution de la part des combustibles pour le fret ferroviaire suivant les scénarios	20
Figure 10. Evolution de la part des combustibles pour le fret fluvial suivant les scénarios	20
Figure 11. Trajectoires d'évolution des taux d'incorporation (PCI) e-fuels aux carburants des motorisations thermiques.....	24
Figure 12. Evolution des quantités de biomasse agricoles disponibles	26
Figure 13. Evolution des quantités de biomasse forestière disponibles.....	27
Figure 14. Potentiel de production des microalgues	29
Figure 15. Trajectoires d'évolution des taux d'incorporation (PCI) des substituts aux carburants des véhicules thermiques	31
Figure 16. Répartition technologique biodiesels (%)	33
Figure 17. Répartition technologique bioessence (%) – Scénario ELEC	35
Figure 18. Répartition technologique bioessence (%) - Scénarios THERM et HYB	36
Figure 19. Répartition technologique biojet (%)	38
Figure 20. Emissions de CO ₂ du secteur transport.....	40
Figure 21. Consommations de diesel et d'essence dans les 3 scénarios	41
Figure 22. Evolution des consommations de biocarburants liquides pour les pools gazole, essence et kérosène	42
Figure 23. Evolution des consommation d'e-fuels liquides pour les pools gazole, essence et kérosène	42
Figure 24. Evolution des consommations de biocarburants liquides par catégories REDII	43
Figure 25. Demande en hydrogène pour les 3 scénarios, avec et sans la production d'e-fuels (en TWh)	44
Figure 26. Consommation d'électricité pour les 3 scénarios, avec et sans les besoins pour la production d'H ₂ (en TWh).....	45
Figure 27. Trajectoires de demandes en biométhane par scénario (en Mtep) pour l'ensemble des secteurs et pour les secteurs hors transport (à gauche) et par technologie (à droite)	46
Figure 28. Trajectoires de déploiement des filières biocarburants pour chacun des 4 pools de carburants gazole, essence, kérosène et GNV (en Mtep) pour le scénario THERM	47
Figure 29. Trajectoires de déploiement des filières biocarburants pour chacun des 4 pools de carburants gazole, essence, kérosène et GNV (en Mtep) pour le scénario HYB.....	48
Figure 30. Trajectoires de déploiement des filières biocarburants pour chacun des 4 pools de carburants gazole, essence, kérosène et GNV (en Mtep) pour le scénario ELEC	48

Figure 31. Variations de l'utilisation des ressources biomasse en 2050, relativement au scénario THERM.....	49
Figure 32. Trajectoires de mobilisation des huiles végétales pour la production de biodiesel dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes d'huile.	50
Figure 33. Trajectoires de mobilisation des cultures sucrières pour la production d'éthanol conventionnel dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes de culture.	51
Figure 34. Trajectoires de mobilisation des céréales pour la production d'éthanol conventionnel dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes de culture.....	52
Figure 35. Trajectoires de mobilisation des huiles et graisses de type déchets pour la production de biodiesels et biokérosène dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes d'huiles	53
Figure 36. Trajectoires de mobilisation des biomasses lignocellulosiques pour la production de biocarburants avancés dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes matière sèche de biomasse.....	54
Figure 37. Trajectoires de mobilisation de biomasse lignocellulosique pour la production totale d'énergie dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes matière sèche de biomasse.....	55
Figure 38. Trajectoires de mobilisation des huiles issues de microalgues lipidiques pour la production de biodiesels et biokérosène dans les scénarios THERM (à gauche) et ELEC (à droite), en million de tonnes d'huiles.	56
Figure 39. Bilan ressources pour méthanisation en Mtep de biogaz (secteur transport uniquement)	57
Figure 40. Bilan ressources pour méthanisation en Mtep de biogaz (secteur transport + autres usages du biogaz)	58
Figure 41. Demande totale de mobilité passager	60
Figure 42. Taux de croissance annuel (à horizon 2050) des différents scénarios de demande de mobilité des passagers	60
Figure 43. Parts modales du transport passager.....	61
Figure 44. Demande totale de transport de marchandises (exprimée en Gt.km)	62
Figure 45. Taux de croissance annuel (à horizon 2050) des différents scénarios de demande de transport de marchandises	62
Figure 46. Répartition des modes de trafic fret	63
Figure 47. Consommation de carburants liquides suivant les variantes sobriété (en Mtep)	64
Figure 48. Evolution des consommations de biocarburants liquides suivant les variantes sobriété (en Mtep).....	65
Figure 49. Evolution des consommation d'e-fuels liquides suivant les variantes sobriété (en Mtep) .	65
Figure 50. Demande en hydrogène du secteur transport suivant les variantes sobriété (en TWh)	66
Figure 51. Consommation électrique du secteur transport suivant les variantes sobriété (en TWh) ..	66
Figure 52. Variations de l'utilisation des ressources biomasse en 2050 suivant les variantes sobriété, relativement aux scénarios initiaux respectifs	67
Figure 53. Comparaison des huiles déchets mobilisées dans les scénarios THERM et SOB avec leur variante sobriété (en Mt d'huile)	77
Figure 54. Comparaison des biomasses lignocellulosiques mobilisées par le secteur transport dans les scénarios THERM et SOB avec leur variante sobriété (en Mt MS de biomasse).....	78
Figure 55. Comparaison des biomasses lignocellulosiques mobilisées par les différents secteurs énergétiques dans les scénarios THERM et SOB avec leur variante sobriété (en Mt MS de biomasse)	78

Tableau 1. Objectifs d'incorporation européens de carburants durables dans le secteur aérien considérés à avril 2023	21
Tableau 2. Hypothèses de répartition des différentes coupes de carburants en sortie de procédé Fischer-Tropsch suivant les stratégies adoptées dans les 3 scénarios.....	23
Tableau 3. Statistiques 2021 des résidus industriels et potentiels à 2030 et 2050	28
Tableau 4. Statistiques de consommation et potentiel de mobilisation des déchets méthanisables pour la production de biogaz par méthanisation.....	28
Tableau 5. Fléchage des usages énergétiques des biomasses	31
Tableau 6. Substituts biodiesels et leurs procédés	32
Tableau 7. Substituts bioessence et leurs procédés	34
Tableau 8. Voies de production du biométhane (ADEME S3).....	36
Tableau 9. Substituts biojet et leurs procédés.....	37
Tableau 10. Demandes en biomasse énergie hors transport (ADEME S3)	39
Tableau 11. Potentiel de production de biogaz des ressources méthanisables	57
Tableau 12. Demandes en biomasse énergie hors transport (ADEME S2)	63
Tableau 13. Voies de production du biométhane (ADEME S2).....	64
Tableau 14 - Statiques de consommation en 2019 et disponibilités Min/Max à horizon 2050 des biomasses agricoles et biomasses bois à vocation énergétiques	76

Références

- [1] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, « Stratégie nationale bas-carbone », mars 2020. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf (consulté le 18 juillet 2023).
- [2] E. Hache *et al.*, *Scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique - Rapport 2013*. 2014.
- [3] N. Alazard-Toux *et al.*, « Scénario "loi de transition énergétique pour la croissance verte" de l'ANCRE : focus sur le mix énergétique », *Rev. Gen. Nucleaire*, n° 1, p. 48-50, janv. 2017, doi: 10.1051/rgn/20171044.
- [4] « Prospective - Transitions 2050 - Rapport », *La librairie ADEME*. <https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/5072-prospective-transitions-2050-rapport.html> (consulté le 19 juin 2023).
- [5] France Stratégie et CGEDD, « Prospective 2040-2060 des transports et des mobilités », février 2022. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/prospective_2040-2060_des_transports_et_des_mobilites_-_rapport_de_synthese_-_fevrier_2022.pdf (consulté le 21 juillet 2023).
- [6] Y. Briand *et al.*, « Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France, Rapport descriptif, IDDR1 ».
- [7] Transport & Environnement, « Comment décarboner le fret français d'ici 2050 ? », 2020.
- [8] R. Pochez, N. Wagner, et I. Cabanne, « Théma - Projections de la demande de transport sur le long terme.pdf », juillet 2016. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Projections%20de%20la%20demande%20de%20transport%20sur%20le%20long%20terme.pdf> (consulté le 21 juillet 2023).
- [9] « Zones à faibles émissions mobilité (ZFE-m) : sortir de l'impasse », *Sénat*. <https://www.senat.fr/rap/r22-738/r22-738.html> (consulté le 18 juillet 2023).
- [10] Ministère chargé de l'Industrie, « Accélérer le déploiement de l'hydrogène, clé de voûte de la décarbonation de l'industrie », février 2023. https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2023/02/230202_dp_hydrogene_decarbonation_industrie.pdf (consulté le 19 juin 2023).
- [11] « Accord du Conseil et du Parlement pour décarboner le secteur de l'aviation ». <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/04/25/council-and-parliament-agree-to-decarbonise-the-aviation-sector/> (consulté le 19 juin 2023).
- [12] PFA - Plateforme automobile, « Évolution & analyse du mix de motorisation des véhicules légers en Europe de 2020 à 2040 - Note technique du WAPO 2021 », juin 2022. https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2021/05/DT_WAPO2021_release07-2022.pdf (consulté le 19 juillet 2023).
- [13] « ANNEX IX Renewable Energy Directive ». https://lexpacency.org/eu/32018L2001/ANX_IX/ (consulté le 19 juillet 2023).
- [14] France Stratégie, « Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel ? », juillet 2021. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-ns_-_biomasse_agricole_-_quelles_ressources_pour_quel_potentiel_-_29-07-21.pdf (consulté le 19 juillet 2023).
- [15] ADEME, GRDF, et GRTgaz, « Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ? » <https://librairie.ademe.fr/cadic/1554/france-independante-mix-gaz-renouvelable-010503a-rapport.pdf> (consulté le 19 juillet 2023).
- [16] FranceAgriMer, « L'Observatoire National des Ressources en Biomasse : Évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires disponibles en France – édition 2020 ». <https://www.franceagrimer.fr/content/download/66147/document/DON-ONRB-VF4.pdf> (consulté le 19 juillet 2023).

- [17] ANCRE, « Position paper : Les puits de carbone : Quels rôles de la recherche pour accélérer leur développement en France ? / Carbon sinks: What role for research in accelerating their development in France? », 18 octobre 2022. <https://www.allianceenergie.fr/position-paper-les-puits-de-carbone-quels-roles-de-la-recherche-pour-accelerer-leur-developpement-en-france/> (consulté le 19 juillet 2023).
- [18] ADEME, IGN, et FCBA, « Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035 », février 2016. <https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/disponibilites-forestieres-pour-energie-materiaux-horizon-2035-rapport.pdf> (consulté le 19 juillet 2023).
- [19] ADEME - INDDIGO, INERIS et Bio by DELOITTE, « Méthodes et protocoles pour caractériser les combustibles issus de déchets : mesure de la fraction renouvelable, vérification que les composants ne sont pas valorisables sous forme de matière », juin 2016.
- [20] ADEME, « Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation ». 2013.
- [21] FranceAgriMer, « Ressources en biomasse et méthanisation agricole : quelles disponibilités pour quels besoins ? », 2022. https://www.franceagrimer.fr/content/download/69402/document/20221007_RESSOURCES_EN_BIOMASSE_ET_METHANISATION_2022_WEB-V2.pdf (consulté le 19 juillet 2023).
- [22] SIA Partners, « Observatoire du biométhane », mars 2019. https://france-biomethane.fr/wp-content/uploads/2019/04/SiaPartners_Observatoire_France_Biomethane_vf-1.pdf (consulté le 19 juillet 2023).
- [23] « Évaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à horizon 2030 », *La librairie ADEME*. <https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/3062-evaluation-du-gisement-potentiel-de-ressources-algales-pour-l-energie-et-la-chimie-en-france-a-horizon-2030.html> (consulté le 19 juin 2023).
- [24] D. KHOLLER et F. LAVARDE, « Présentation et développement de l'algoculture en France », *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire*. <https://agriculture.gouv.fr/presentation-et-developpement-de-lalgoculture-en-france> (consulté le 19 juillet 2023).
- [25] RTE, « Futurs Energetiques 2050 ». octobre 2021.
- [26] C. Raux, « Les permis négociables dans le secteur des transports ».

Annexes

Annexe 1 : Hypothèses de disponibilités Min/Max à horizon 2050 des biomasses agricoles et biomasses bois à vocation énergétiques

Tableau 14 - Statiques de consommation en 2019 et disponibilités Min/Max à horizon 2050 des biomasses agricoles et biomasses bois à vocation énergétiques

	2019	2050	
		Min	Max
Biomasses agricoles			
Cultures oléagineuses (Mt MB)	1,77	1,77	1,77
Céréales (Mt MB)	3,52*	3,52	3,52
Betterave sucrière (Mt MB)	3,65*	3,65	3,65
Résidus de récolte agricoles (tiges, fanes, tailles vergers/vignes, ...) (Mt MS)	7,3	13,2	23,4
Cultures pérennes lignocellulosiques (Mt MS)	0,0	10,1	24,6
CIVE (Mt MS)	2,0	11,2	20,9
Biomasses bois			
Résidus de bois issus de l'exploitation forestière (Mt MS)	13,4	14,2	26,6
Résidus de bois d'industrie (Mt MS)	1,1	3,7	3,7
Résidus de bois hors forêt (Mt MS)	1,1	1,7	1,7
Bois en fin de vie (Mt MS)	3,5	3,6	3,6
Total biomasses bois (Mt MS)	19,1	23,2	35,6

* Les statistiques de consommations de ressources céréales et betteraves sucrières correspondent à celles de l'année 2022

Mt MS : millions de tonnes de matières sèche

Mt MB : millions de tonnes de matières brutes

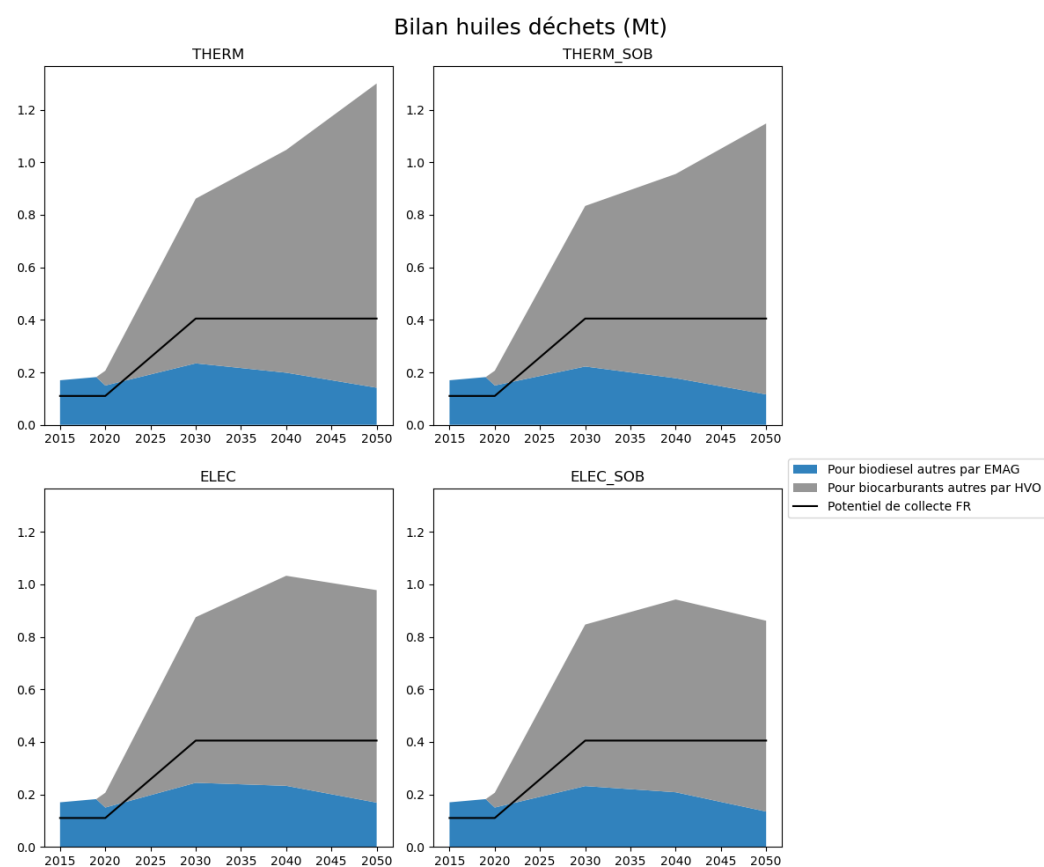


Figure 53. Comparaison des huiles déchets mobilisées dans les scénarios THERM et SOB avec leur variante sobriété (en Mt d'huile)

Bilan ressources ligno (Mt) - Secteur transport

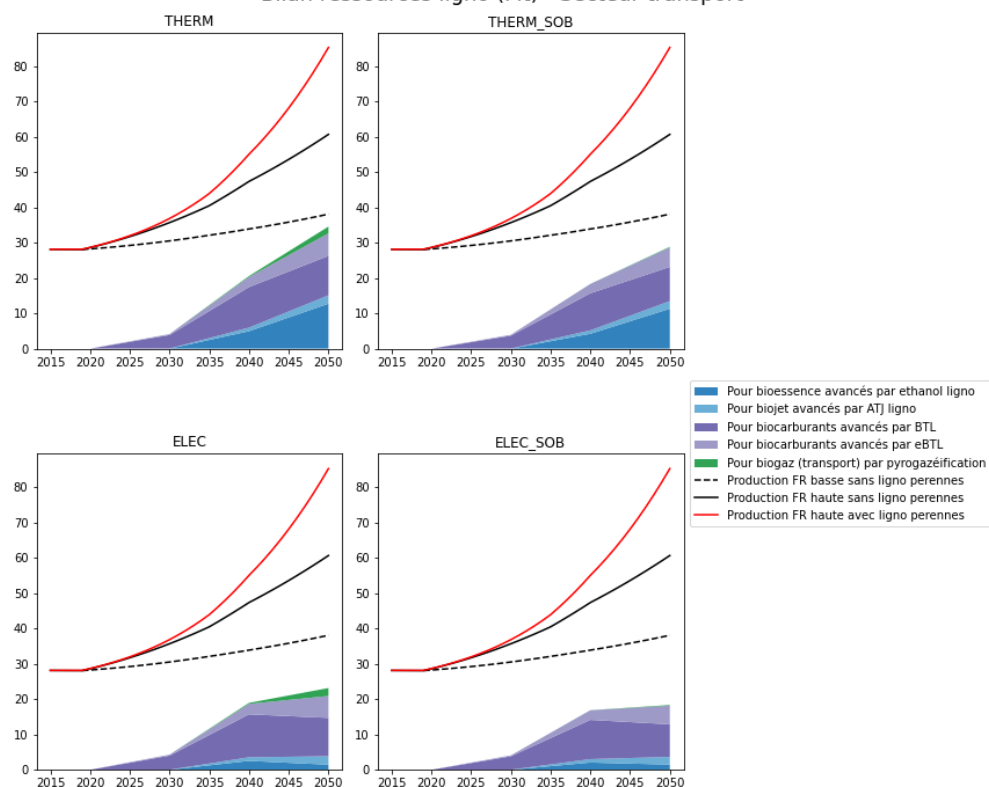


Figure 54. Comparaison des biomasses lignocellulosiques mobilisées par le secteur transport dans les scénarios THERM et SOB avec leur variante sobriété (en Mt MS de biomasse)

Bilan ressources ligno (Mt) - Tous secteurs

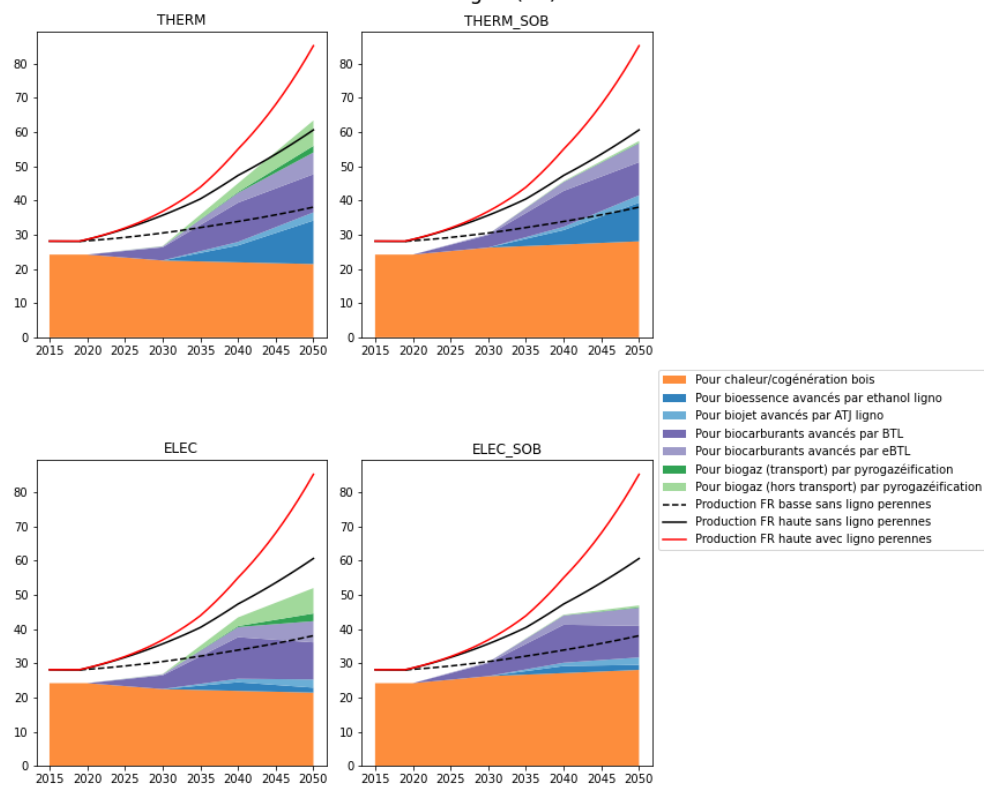


Figure 55. Comparaison des biomasses lignocellulosiques mobilisées par les différents secteurs énergétiques dans les scénarios THERM et SOB avec leur variante sobriété (en Mt MS de biomasse)